

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA

DEPARTAMENTO DE INGENIERIA ELECTRONICA



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA

Contribución a la mejora de la eficiencia energética en sistemas trifásicos a cuatro hilos mediante la compensación selectiva de las potencias ineficientes.

TESIS DOCTORAL

Doctorando:

Nicolás Muñoz Galeano

Dirigida por:

Dr. D. Salvador Seguí Chilet

Dr. D. Salvador Orts Grau

Valencia, 2011

AGRADECIMIENTOS

Deseo mostrar mi más sincero agradecimiento a todas las personas que de una u otra manera contribuyeron con la realización de esta tesis. Especialmente a mis directores por su apoyo incondicional y a mi familia por su paciencia y comprensión.

Gracias.

RESUMEN

Esta tesis doctoral trata acerca de los sistemas de compensación activos con conexión en paralelo, utilizados para la mejora de la calidad de la potencia y de la eficiencia energética en las redes eléctricas de distribución y en las instalaciones a cuatro hilos. En la presente tesis se desarrolla un nuevo control del filtro o compensador activo de potencia con la capacidad de seleccionar las potencias ineficientes a compensar basado en el IEEE Std 1459-2010.

Algunos términos de potencia definidos en la IEEE Std. 1459-2010 presentan inconsistencias cuando se desarrollan las expresiones propuestas en la norma. Estas inconsistencias son corregidas con un nuevo procedimiento de cálculo que redefine la corriente efectiva (I_e) y el voltaje efectivo (V_e). Con los nuevos valores de V_e e I_e algunas magnitudes de la IEEE Std. 1459-2010 son recalculadas mientras que otras no se modifican.

Se propone el uso de la teoría de la potencia instantánea para explicar los fenómenos que suceden en los sistemas eléctricos. Esta nueva teoría de la potencia eléctrica sirve simultáneamente para medir, cuantificar, y compensar los fenómenos de los sistemas eléctricos, inclusive puede ser usada para determinar las fuentes de distorsión armónica. Mediante el análisis de los flujos de potencia instantáneos se demuestra que la única potencia eficiente de los sistemas eléctricos es la potencia activa fundamental de secuencia positiva (P_1^+).

En relación con el compensador activo de potencia, se deducen las corrientes que debe inyectar el compensador para la estrategia de compensación global, en la que el SAPC genera todas las corrientes ineficientes que demanda la carga. Estas corrientes están basadas en la norma IEEE Std. 1459-2010 y en la nueva teoría de la potencia instantánea propuesta. Teniendo en cuenta de que los compensadores, como cualquier dispositivo eléctrico o electrónico, tienen límites en su potencia de salida, también se proponen expresiones para las corrientes de compensación en el caso de que el compensador no tenga capacidad suficiente para eliminar todas las potencias ineficientes de la carga (modo de compensación selectiva).

Se establecen criterios de selectividad para la compensación de las potencias ineficientes de la carga. Con estos criterios se optimiza la transferencia de potencia útil de la red de suministro a la carga, se optimiza el uso del compensador, se minimizan las pérdidas y los efectos nocivos en el sistema eléctrico de distribución de potencia, y se reducen los costos de operación de las cargas eléctricas.

Se incluyen resultados de simulación y experimentales del sistema de compensación diseñado para todas las estrategias de compensación propuestas. Los resultados demuestran el buen funcionamiento del compensador selectivo propuesto, el cual logra la mejora de la calidad de la potencia eléctrica. Finalmente se incluyen las conclusiones, aportaciones, líneas de trabajo futuro y las publicaciones derivadas de los resultados de investigación de la tesis doctoral.

RESUM

Aquesta tesi doctoral tracta sobre els sistemes de compensació actius amb connexió en paral·lel, utilitzats per a la millora de la qualitat de la potència i de la eficiència energètica en les xarxes elèctriques de distribució i en les instal·lacions a quatre fils. En la present tesis es desenvolupa un nou control del filtre o compensador actiu de potència amb la capacitat de seleccionar les potències ineficients a compensar.

Alguns termes de potència definits en la IEEE Std. 1459-2010 presenten inconsistències quan es desenvolupen les expressions proposades en la pròpia norma. Aquestes inconsistències són corregides amb un nou procediment de càlcul. Amb el nou procediment de càlcul proposat es redefineix la corrent efectiva (I_e) i el voltatge efectiu (V_e). Amb els nous valors de V_e i I_e algunes magnituds de la IEEE Std. 1459-2010 són recalculades mentre que altres no es modifiquen.

Es proposa la teoria de la potència instantània per a explicar els fenòmens que succeeixen en els sistemes elèctrics. Aquesta nova teoria de la potència elèctrica serveix simultàniament per a mesurar, quantificar i compensar els fenòmens dels sistemes elèctrics, inclusivament pot ser utilitzada per a determinar les fonts de distorsió armònica. Mitjançant l'anàlisi dels fluxos de potència instantanis es demostra que l'única potència eficient dels sistemes elèctrics és la potència activa fonamental de seqüència positiva (P_1^+).

Es dedueixen les corrents que deu injectar el compensador per a l'estratègia de compensació global, aquella que genera totes les corrents ineficients que demanda la carga. Aquestes corrents estan basades en la norma IEEE Std 1459-2010 i en la nova teoria de la potència instantània proposada. Tenint en compte que els compensadors, com qualsevol dispositiu elèctric o electrònic, tenen límits en la seva potència d'eixida. També es proposen expressions per a les corrents de compensació en el cas de que el compensador no tinga capacitat suficient per a eliminar totes les potències ineficients de la carga.(mode de compensació selectiu)

S'estableixen criteris de selectivitat per a la compensació de les potències ineficients de la carga. Amb aquests criteris s'optimitza la transferència de potència útil de potència del generador a al carga, s'optimitza l'ús del compensador, es minimitzen les pèrdues i els efectes nocius en el sistema elèctric de distribució de potència, i es redueixen els costos d'operació de les càrregues elèctriques.

S'inclouen resultats de simulació i experimentals del sistema de compensació dissenyat per a totes les estratègies de compensació proposades. Els resultats demostren el bon funcionament del compensador selectiu proposat, el qual aconsegueix la millora de la qualitat de la potència elèctrica. Finalment s'inclouen les conclusions, aportacions, línies de treball futur i les publicacions derivades dels resultats d'investigació de la tesi doctoral.

ABSTRACT

This PhD thesis deals with shunt active power compensation systems used to improve power quality and efficiency in low voltage electric power networks. In this work, a new active power filter with selective capabilities has been developed.

Some power quantities defined in the IEEE Std. 1459-2010 have inconsistencies when are resolved. These inconsistencies are corrected with a new approach developed in this work. The new approach propose new expressions of the effective current (I_e), and the effective voltage (V_e). With the new expressions of V_e and I_e , some IEEE Std. 1459-2010 power quantities are recalculated.

The instantaneous power theory is proposed to explain phenomena in electrical systems. This theory can provide a simultaneous common base for the measurement and quantification of the power magnitudes, and for dynamic compensation. This theory can also be used to detect the sources of waveform distortion. Analysing the instantaneous power flow, the positive-sequence active power P_1^+ is the unique power considered ussefull.

The currents used for active power filters are deduced for global compensation when the filter has the capacity to compensate all inefficient currents that the load demands. These currents are based on IEEE Std. 1459-2010 and the proposed instantaneous power theory. As all electrical or electronical devices, the active power filters have limits in its output power. In these case, all inefficient currents can not be compensated and the maximum output power limit in the active filter is reached. Under this operating conditions, the currents for the filter are also deduced and the filter works in a selective compensation mode.

Selectivity criteria are proposed to reduce the usseles powers in the supply. With these criteria the transfer of useful power is more efficient, the use of the active power filter is optimized, the power losses and nocive effects are reduced, and the operation cost are minimized.

Both simulated and experimental results of the proposed selective active power filter, including all proposed compensation strategies, are presented. The results demonstrate not only that the proposed system improves the electrical power quality but also the excellent behaviour of the selective compensation strategies.

Finally conclusions, contributions, future research areas, and publications product of these Phd thesis are presented.

INDICE GENERAL

MOTIVACIÓN, OBJETIVOS Y SUMARIO DE LA TESIS DOCTORAL	1
Motivación.....	1
Objetivos.....	3
Sumario.....	5
Sumario.....	5
1. LA ÚLTIMA TEORÍA DE POTENCIA ELÉCTRICA RECONOCIDA: LA IEEE STD. 1459-2010.	7
1.1. Cuantificación de la potencia eléctrica basada en la IEEE Std. 1459-2010.....	8
1.1.1. Sistemas eléctricos monofásicos.....	9
1.1.1.1. Sistemas eléctricos monofásicos lineales.....	10
1.1.1.2. Sistemas eléctricos monofásicos no lineales.....	12
1.1.2. Sistemas eléctricos trifásicos.....	15
1.1.2.1. Sistema eléctrico trifásico lineal y equilibrado.....	17
1.1.2.2. Sistema eléctrico trifásico lineal y desequilibrado.....	19
1.1.2.3. Sistema eléctrico trifásico no lineal con voltajes asimétricos y corrientes desequilibradas.....	21
1.2. Analisis y aportaciones de la teoría de la potencia eléctrica IEEE Std. 1459-2010.	25
1.2.1. Extensión de la división de las potencias eléctricas de la IEEE Std. 1459-2010: Extensión de la potencia de desequilibrio fundamental.....	26
1.2.2. Nueva cuantificación para las potencias que conforman la potencia de desequilibrio fundamental.....	28
1.2.3. Inconsistencias detectadas en la IEEE Std. 1459-2010.....	30
1.2.3.1. Voltaje asimétrico fundamental y carga desequilibrada lineal.....	31
1.2.3.2. Sistema de potencia equilibrado con presencia de armónicos de tercer orden de corriente y de voltaje.....	32
1.2.3.3. Carga monofásica no lineal superpuesta con un sistema trifásico de potencia lineal y equilibrado.....	34
1.2.3.4. Nueva propuesta para el cálculo de los términos de potencia de la IEEE Std. 1459-2010.....	37

1.2.3.5. Estudio comparativo de magnitudes de la IEEE Std. 1459-2010.	39
1.3. Conclusiones	43
2. EXTENSIÓN DE LA TEORÍA DE POTENCIA ELÉCTRICA DESARROLLADA EN LA IEEE STD. 1459-2010 MEDIANTE EL ESTUDIO DE LOS FLUJOS DE POTENCIA INSTANTÁNEA EN LOS SISTEMAS ELÉCTRICOS.	45
2.1. Cuantificación de potencia para sistemas lineales y equilibrados.	48
2.2. Cuantificación de potencia para sistemas lineales con voltajes simétricos y corrientes desequilibradas.....	52
2.3. Cuantificación de potencia para sistemas con cargas no lineales.	56
2.3.1. Cuantificación de potencia para armónicos equilibrados de corriente de secuencia positiva.....	65
2.3.2. Cuantificación de potencia para armónicos equilibrados de corriente de secuencia negativa.....	70
2.3.3. Cuantificación de potencia para armónicos equilibrados de corriente de secuencia cero.	74
2.3.4. Cuantificación de potencia para sistemas con cargas no lineales y tensiones no sinusoidales.	78
2.4. Conclusiones	82
3. PÉRDIDAS Y EFECTOS EN LOS SISTEMAS ELÉCTRICOS PROVOCADOS POR LA CONEXIÓN DE CARGAS INEFICIENTES.	85
3.1. Pérdidas en conductores y otros efectos provocados por la conexión de cargas ineficientes.....	85
3.1.1. Pérdidas de potencia en redes de distribución o conductores de alimentación..	86
3.1.1.1. Sistema trifásico a 4 hilos con voltajes simétricos fundamentales y con carga reactiva, lineal y equilibrada.	89
3.1.1.2. Sistema trifásico a 4 hilos con voltajes simétricos fundamentales y con carga netamente resistiva, lineal, y desequilibrada.	91
3.1.1.3. Sistema trifásico a 4 hilos con voltajes simétricos fundamentales y con carga netamente resistiva, no lineal, y equilibrada.....	94
3.1.1.4. Resumen de las pérdidas de potencia en los conductores de alimentación.	95

3.1.2.	Otros efectos provocados por la circulación de corrientes por los conductores de alimentación.....	98
3.1.2.1.	Caídas de tensión (c.d.t) en los conductores de alimentación, y tensión asimétrica y distorsionada en bornes de la carga.....	98
3.1.2.2.	Circulación de corrientes ineficientes hacia otras cargas vecinas eficientes.	102
3.2.	Pérdidas en transformadores provocados por la conexión de cargas ineficientes..	105
3.2.1.	Pérdida de potencia provocada por la histeresis del núcleo del transformador.	109
3.2.2.	Pérdida de potencia en el cobre.....	112
3.2.3.	Pérdida de potencia provocada por las corrientes de Eddy en los devanados del transformador.....	114
3.2.4.	Pérdida de potencia provocada por las corrientes de Eddy en la carcasa y alrededores.....	119
3.2.5.	Resumen de las pérdidas de potencia en transformadores.....	121
3.3.	Pérdidas en máquinas rotativas y otros efectos provocados por la conexión de cargas ineficientes.....	123
3.3.1.	Pérdidas de potencia provocadas en las máquinas rotativas.....	127
3.3.1.1.	Pérdidas de potencia en el cobre provocada por las corrientes que circulan por los devanados del estator y del rotor.....	128
3.3.1.2.	Pérdida de potencia provocada por las corrientes de Eddy en los núcleos de las máquinas rotativas.....	131
3.3.1.3.	Pérdida de potencia provocada por la histeresis en los núcleos de las máquinas rotativas.....	134
3.3.1.4.	Pérdidas de potencia mecánicas de las máquinas rotativas.....	135
3.3.1.5.	Pérdida de potencia provocada por las corrientes de Eddy en la carcasa y alrededores de las máquinas rotativas.....	135
3.3.2.	Efectos de las potencias ineficientes en el par de las máquinas rotativas.....	137
3.3.3.	Resumen de las pérdidas de potencia y efectos en las máquinas rotativas.....	139
3.4.	Conclusiones.....	141
4.	COMPENSADOR ACTIVO DE POTENCIA PARALELO (SAPC).	143

4.1.	Corrientes de compensación en la estrategia de compensación global.....	148
4.2.	Corriente de compensación para la estrategia de compensación selectiva.	152
4.2.1.	Cálculo de la corriente instantánea no fundamental.....	154
4.2.2.	Cálculo de la corriente instantánea fundamental de desequilibrio.	155
4.2.3.	Cálculo de la componente reactiva de la corriente instantánea fundamental de secuencia positiva.....	157
4.2.4.	Corrientes de compensación para la eliminación de la corriente del neutro. Estrategia de compensación N.	159
4.2.4.1.	Cálculo de la componente de corriente instantánea fundamental que circula por el neutro.	160
4.2.4.2.	Cálculo de las componentes de corriente instantáneas no fundamentales que circulan por el neutro.	161
4.3.	SAPC's con limitación de potencia.	162
4.3.1.	Corrientes de compensación para SAPC's con estrategia de compensación global modificada y con limitación de potencia.....	163
4.3.2.	Corrientes de compensación para SAPC's con estrategia de potencia selectiva y con limitación de potencia.....	163
4.3.3.	Corrientes de compensación para SAPC's para la reducción de la corriente del neutro y con limitación de potencia.....	165
4.4.	Algoritmos para el escalado de las corrientes de compensación en SAPC's.....	167
4.4.1.	Algoritmos para el escalado de las corrientes de compensación global.....	167
4.4.1.1.	Primer algoritmo para realizar el escalado de las corrientes de compensación global.....	168
4.4.1.2.	Segundo algoritmo para realizar el escalado de las corrientes de compensación global.....	178
4.4.1.3.	Tercer algoritmo para realizar el escalado de las corrientes de compensación global. Estrategia de compensación G_L	186
4.4.2.	Algoritmo para realizar el escalado de las corrientes de compensación usando la estrategia de compensación selectiva.	192
4.4.2.1.	Función "Posibilidad 1".....	197
4.4.2.2.	Función "Posibilidad 2".....	202

4.4.2.3.	Función “Posibilidad 3”.....	210
4.4.2.4.	Función “Posibilidad 4”. Estrategia de compensación G_T	218
4.5.	Conclusiones.....	219
5.	CRITERIOS PARA LA COMPENSACIÓN SELECTIVA DE LAS POTENCIAS INEFICIENTES DE LA CARGA.....	221
5.1.	Criterio 1: Maximizar la potencia entregada por el SAPC a la carga.....	222
5.2.	Criterio 2: Mejorar la calidad de la potencia de los sistemas eléctricos.....	225
5.3.	Criterio 3: Contribuir con la estabilidad de los sistemas eléctricos.....	230
5.3.1.	Análisis de las principales causas que provocan los huecos de tensión.....	232
5.3.2.	Análisis de estabilidad del generador sincrónico.....	235
5.3.3.	Compensación selectiva para disminuir los efectos de los huecos de tensión.....	238
5.3.4.	Análisis del hueco de tensión cuando el SAPC inyecta I_1^{+r}	242
5.4.	Criterio 4: Minimizar el costo de la factura eléctrica.....	246
5.5.	Criterio 5: Minimizar las pérdidas de potencia en el sistema eléctrico de distribución.....	250
5.6.	Criterio 6: Evitar superar el límite térmico de los conductores de alimentación.....	252
5.7.	Criterio 7: Reducir la corriente del neutro.....	253
5.8.	Análisis de la prioridad en el uso de los criterios para la compensación selectiva.....	254
5.8.1.	Usuarios finales.....	254
5.8.2.	Empresas distribuidoras de energía.....	255
5.9.	Conclusiones.....	256
6.	RESULTADOS DE SIMULACIÓN.....	261
6.1.	Simulación de las corrientes de la carga.....	262
6.2.	Simulación del SAPC para las corrientes de compensación y corrientes de la red.....	266
6.2.1.	Validación de las corrientes de compensación.....	268
6.2.1.1.	Compensación de Q_1^+	268
6.2.1.2.	Compensación de $S_{U1\#}$	270
6.2.1.3.	Compensación de $S_{eN\#}$	272

6.2.1.4.	Compensación conjunta de Q_1^+ y $S_{U1\#}$	275
6.2.1.5.	Compensación conjunta de $S_{U1\#}$ y $S_{eN\#}$	277
6.2.1.6.	Compensación conjunta de Q_1^+ y $S_{eN\#}$	279
6.2.1.7.	Compensación conjunta de Q_1^+ , $S_{U1\#}$, y $S_{eN\#}$. Estrategia de compensación G_T .	281
6.2.2.	SAPC's con limitación de potencia.....	283
6.2.2.1.	Compensación de las potencias ineficientes de la carga usando la estrategia de compensación selectiva S1 ($S_{eN\#}$, $S_{U1\#}$, Q_1^+).....	283
6.2.2.2.	Compensación de las potencias ineficientes de la carga usando la estrategia de compensación selectiva S2 ($S_{eN\#}$, Q_1^+ , $S_{U1\#}$).....	286
6.2.2.3.	Compensación de las potencias ineficientes de la carga usando la estrategia de compensación selectiva S3 ($S_{U1\#}$, $S_{eN\#}$, Q_1^+).....	288
6.2.2.4.	Compensación de las potencias ineficientes de la carga usando la estrategia de compensación selectiva S4 (Q_1^+ , $S_{eN\#}$, $S_{U1\#}$).....	290
6.2.2.5.	Compensación de las potencias ineficientes de la carga usando las estrategias de compensación selectiva S5 ($S_{U1\#}$, Q_1^+ , $S_{eN\#}$) y S6 (Q_1^+ , $S_{U1\#}$, $S_{eN\#}$).....	293
6.2.2.6.	Compensación de las potencias ineficientes de la carga usando la estrategia de compensación global modificada G_L	295
6.2.2.7.	Compensación de las corrientes del neutro. Estrategia de compensación N.	297
6.2.2.8.	Análisis de los criterios para la compensación con limitación de potencia.	299
6.3.	Conclusiones.....	303
7.	ENSAYOS Y RESULTADOS EXPERIMENTALES.....	305
7.1.	Medición de la tensión del pcc.....	311
7.2.	Medición de la corriente de la carga.....	312
7.3.	Pruebas experimentales conectando el SAPC.....	314
7.3.1.	Validación de las corrientes de compensación.....	314
7.3.1.1.	Compensación de Q_1^+	314
7.3.1.2.	Compensación de $S_{U1\#}$	317

7.3.1.3.	Compensación de $S_{eN\#}$	319
7.3.1.4.	Compensación conjunta de Q_1^+ y $S_{U1\#}$	321
7.3.1.5.	Compensación conjunta de $S_{U1\#}$ y $S_{eN\#}$	323
7.3.1.6.	Compensación conjunta de Q_1^+ y $S_{eN\#}$	326
7.3.1.7.	Compensación conjunta de Q_1^+ , $S_{U1\#}$, y $S_{eN\#}$. Estrategia de compensación G_T	328
7.3.2.	SAPC's con limitación de potencia	331
7.3.2.1.	Compensación de las potencias ineficientes de la carga usando la estrategia de compensación selectiva S1 ($S_{eN\#}$, $S_{U1\#}$, Q_1^+)	331
7.3.2.2.	Compensación de las potencias ineficientes de la carga usando la estrategia de compensación selectiva S2 ($S_{eN\#}$, Q_1^+ , $S_{U1\#}$)	334
7.3.2.3.	Compensación de las potencias ineficientes de la carga usando la estrategia de compensación selectiva S3 ($S_{U1\#}$, $S_{eN\#}$, Q_1^+)	336
7.3.2.4.	Compensación de las potencias ineficientes de la carga usando la estrategia de compensación selectiva S4 (Q_1^+ , $S_{eN\#}$, $S_{U1\#}$)	339
7.3.2.5.	Compensación de las potencias ineficientes de la carga usando las estrategias de compensación selectiva S5 ($S_{U1\#}$, Q_1^+ , $S_{eN\#}$) y S6 (Q_1^+ , $S_{U1\#}$, $S_{eN\#}$)	341
7.3.2.6.	Compensación de las potencias ineficientes de la carga usando la estrategia de compensación global modificada G_L	344
7.3.2.7.	Compensación de las corrientes del neutro. Estrategia de compensación N.	346
7.3.2.8.	Análisis de los criterios para la compensación con limitación de potencia.	348
7.4.	Conclusiones	352
8.	APORTACIONES Y CONCLUSIONES, LÍNEAS DE TRABAJO FUTURO, Y PUBLICACIÓN DE RESULTADOS	355
8.1.	Aportaciones y conclusiones	355
8.2.	Líneas de trabajo futuro	358
8.3.	Publicaciones derivadas de la tesis doctoral	360
9.	REFERENCIAS	363
	APÉNDICE I: ÍNDICE DE TÉRMINOS	375

MOTIVACIÓN, OBJETIVOS Y SUMARIO DE LA TESIS DOCTORAL

Motivación.

Un sistema eléctrico es eficiente cuando la energía producida por los generadores de la red de suministro es aprovechada completamente por la carga, para esto la red eléctrica debe suministrar un sistema de tensiones eficiente (simétrico y senoidal fundamental) y la carga debe demandar un sistema de corrientes eficiente (equilibrado, senoidal fundamental, y en fase con el sistema de tensiones). Sin embargo, cuando no se dan las condiciones ideales de funcionamiento aparecen efectos adversos (ineficientes) en los componentes del sistema eléctrico que impiden el total aprovechamiento de la energía, haciendo que el sistema sea más ineficiente. Las causas de la baja eficiencia de los sistemas eléctricos que pueden encontrarse en la bibliografía técnica incluyen: desequilibrios de tensión y corriente, consumo de energía reactiva asociada a cargas reactivas (inductivas y capacitivas), cargas no lineales, fuentes de tensión distorsionadas, huecos de tensión (sags), parpadeo de lámparas (flickers), elevaciones de tensión (swells), etc. La mayor parte de las ineficiencias provocadas por las citadas causas pueden mitigarse mediante el uso de compensadores activos basados en convertidores electrónicos de potencia.

Los compensadores activos se dividen en compensadores activos serie, paralelo, e híbridos. Los compensadores activos serie se utilizan principalmente para corregir las ineficiencias ocasionadas por la presencia de tensiones no fundamentales y/o asimétricas en el sistema eléctrico. Los compensadores activos paralelo se utilizan para corregir las ineficiencias ocasionadas por la presencia de corrientes no fundamentales, desequilibradas, y reactivas demandadas por la carga. En sistemas de distribución eléctrica en baja tensión las corrientes que circulan por el sistema pueden ser muy grandes, lo que complica enormemente el diseño de compensadores serie que tengan que manejar toda la corriente demandada por el sistema. Es por ello que los compensadores serie son más habituales en sistemas eléctricos de media y alta tensión, donde el rango de corriente es muy inferior, mientras que los compensadores paralelo pueden encontrarse comúnmente en redes de baja tensión.

La mayoría de las ineficiencias presentes en los sistemas eléctricos son ocasionadas por cargas que operan de forma ineficiente en las redes de baja tensión. Si la corrección de las ineficiencias se realiza en las cercanías de donde se producen, el impacto de las ineficiencias en el conjunto del sistema eléctrico es menor. Es por ello que el estudio de los compensadores activos paralelos es un campo dinámico dado el interés que suscita su aplicación y la mejora de la eficiencia energética que pueden reportar. Su uso empieza a ser habitual y aumentará en el futuro debido al creciente interés por la eficiencia energética para el mejor aprovechamiento de la red de distribución y al precio creciente de la energía eléctrica, ya que se aplican recargos a los consumos ineficientes. Todo ello justifica la realización de una tesis doctoral en el campo

de los compensadores activos paralelo para la mejora de la eficiencia energética en sistemas eléctricos de distribución a cuatro hilos.

Los compensadores activos paralelo son usados actualmente para suministrar las corrientes ineficientes que la carga demanda, de tal modo que, el sistema eléctrico sólo suministra la corriente eficiente consumida por la misma. Basándose en alguna teoría de la potencia eléctrica, el circuito de control del compensador activo de potencia determina la parte de la corriente de carga que se considera ineficiente. Una vez determinadas, el compensador generará dichas corrientes, de forma que, tras la compensación, la red sólo suministrará corrientes eficientes.

Como cualquier dispositivo eléctrico o electrónico, los compensadores activos paralelo tienen limitaciones en su potencia (corriente) de salida, por lo que en determinadas situaciones no todas las corrientes ineficientes pueden ser compensadas. El funcionamiento habitual en este tipo de situaciones consiste en calcular las corrientes de compensación y aplicar un coeficiente de atenuación para que la corriente máxima en la salida del compensador no supere los límites impuestos en su diseño. Bajo esta situación, las corrientes ineficientes son parcialmente compensadas.

Otra opción para evitar superar los límites de potencia del compensador es calcular las corrientes de compensación para cada efecto ineficiente, y luego seleccionar que efecto compensar. Con esta opción, algunos fenómenos ineficientes son compensados y otros no. En los últimos años ha crecido el interés por la compensación selectiva de los fenómenos ineficientes. Gran parte de los trabajos realizados tratan sobre la identificación de determinadas componentes armónicas demandadas por la carga, mientras que algunos tratan sobre la compensación selectiva de ciertas componentes fundamentales o armónicas de las corrientes asociadas a diversas potencias ineficientes. Realmente existe una reducida extensión de artículos técnicos debido a la dificultad de tratar simultáneamente la compensación selectiva de las ineficiencias junto con el criterio que ha de decidir la ponderación entre las ineficiencias. En los pocos trabajos existentes, no se plantea el estudio de cual es la ineficiencia que hay que compensar primero, y también sólo se establecen criterios simples que no se apoyan en ningún estudio del sistema eléctrico para la toma de decisión.

Con la utilización de un compensador activo con la capacidad de selección y decisión de las potencias ineficientes a compensar, se proporciona gran versatilidad en lo referente a las posibilidades de gestión de la calidad de la red eléctrica y de la mejora de la eficiencia energética, se aprovecha de forma más eficiente las redes de distribución eléctrica y se mejora la calidad de la potencia.

Objetivos.

Para la mejora de la calidad de la potencia y el ahorro energético en las redes eléctricas de distribución a cuatro hilos, en esta tesis se propone la utilización de un compensador activo paralelo con la capacidad de seleccionar y decidir las potencias ineficientes a compensar. Los objetivos que se plantean son los siguientes:

Objetivos principales:

- Elegir una teoría de la potencia eléctrica que identifique y cuantifique las diversas potencias ineficientes presentes en los sistemas eléctricos mediante magnitudes relacionadas con las componentes de las corrientes demandadas por la carga y de las tensiones en el punto de conexión con la red.
- A partir del estudio de los efectos adversos que los fenómenos ineficientes producen en los componentes del sistema eléctrico, establecer los criterios de selectividad para la compensación activa de las ineficiencias contribuyendo a la mejora de la eficiencia energética en los sistemas trifásicos a cuatro hilos.
- Mediante estudios teóricos, experimentales, y de simulación, establecer un procedimiento para seleccionar el criterio de selectividad más conveniente de acuerdo a los intereses que se tengan o problemas que se presenten.
- Diseñar el control de un compensador activo paralelo con la capacidad de compensar de forma selectiva las corrientes ineficientes que demanda la carga.

Objetivos secundarios:

- Explicar los fenómenos físicos que suceden en los sistemas eléctricos mediante el uso de la teoría de la potencia instantánea, establecer mediante esta teoría qué potencias son eficientes y cuales son ineficientes, y proponer una nueva cuantificación de potencia eléctrica que sirva simultáneamente para la implementación de equipos de medida y de compensación.
- Estudiar las diferentes ineficiencias de potencia que aparecen en los sistemas eléctricos y que son tratadas en la IEEE Std. 1459-2010. Establecer mediante una completa revisión bibliográfica y estudios de simulación los efectos que producen las ineficiencias sobre los elementos que componen los sistemas eléctricos: generadores, transformadores, líneas de transmisión, redes de distribución, motores, inversores, dispositivos electrónicos, etc.
- Establecer en que condiciones debe ser usada la compensación global, comparar la compensación global y la compensación selectiva como estrategias de compensación, y calcular las corrientes ineficientes que deben ser inyectadas por el compensador.

- Establecer un criterio de selectividad para la compensación de las potencias ineficientes de la carga, de tal modo que se mejore la transferencia de potencia útil de la red de suministro a la carga, se eviten daños o problemas en los sistemas eléctricos, y se reduzcan las pérdidas de potencia aumentando la eficiencia energética.

Sumario.

La tesis doctoral se ha estructurado en nueve capítulos:

El capítulo 1 resume la cuantificación de potencia para sistemas trifásicos a cuatro hilos propuesta por la IEEE Std. 1459-2010. La IEEE Std. 1459-2010 es la última teoría de potencia eléctrica desarrollada por la sociedad IEEE y en ella se encuentran las definiciones para la medida de las diferentes magnitudes eléctricas bajo condiciones lineales, no lineales, equilibradas y no equilibradas. El análisis detallado de la IEEE Std. 1459-2010 permite encontrar algunas inconsistencias entre las nuevas definiciones y las comúnmente aceptadas (incluso en el propio estándar) en ciertos casos particulares. Para evitar estas inconsistencias se proponen correcciones en la definición y el cálculo de algunas magnitudes eléctricas.

El capítulo 2 propone el uso de la teoría de potencia instantánea basada en el producto de voltajes y corrientes instantáneas para la cuantificación de las potencias presentes en el sistema eléctrico. Esta teoría puede ser utilizada simultáneamente para medir, cuantificar, evaluar la calidad de la potencia, diseñar compensadores activos que mejoran la calidad de la potencia eléctrica, e inclusive determinar las fuentes de distorsión armónica.

El capítulo 3 se centra en los efectos provocados por las ineficiencias en los sistemas eléctricos. Las ineficiencias que se estudiarán son las ineficiencias tratadas en la IEEE Std. 1459-2010: asimetrías de tensión, desequilibrios de la carga, fuentes distorsionadas de tensión, cargas no lineales y cargas reactivas. Se expondrán los efectos que estas ineficiencias provocan sobre los elementos que componen los sistemas eléctricos: generadores, transformadores, líneas de transmisión, redes de distribución, y motores. Se analizará como las ineficiencias provocan daños en los equipos, alteran su funcionamiento normal, y ocasionan pérdidas de potencia.

El capítulo 4 expone en que tipo de situaciones debe ser usado el compensador activo paralelo, en el que se usarán las estrategias de compensación global y selectiva según las diversas situaciones que pueden plantearse en los sistemas eléctricos de distribución de energía eléctrica. Para estas estrategias se plantearán las corrientes ineficientes a ser inyectadas por el compensador. Dado que los compensadores activos tienen una potencia limitada, no es posible en algunos casos compensar totalmente las corrientes ineficientes que la carga demanda, así que solamente una parte de esta corriente puede ser compensada en estos casos. Para limitar la potencia del compensador se plantean algoritmos para escalar las corrientes de compensación en las estrategias de compensación global y selectiva, se analizan estos algoritmos y se seleccionará el que mejores resultados proporcione. La compensación selectiva es una estrategia de compensación que puede llegar a ser más eficiente que la compensación global al identificar y compensar cada ineficiencia por separado, discriminando las más perjudiciales y permitiendo obtener sistemas eléctricos con menores pérdidas y con mejor calidad de suministro eléctrico.

El capítulo 5 establece los criterios de selectividad para compensar las potencias ineficientes demandadas por la carga mediante un compensador activo paralelo. Los criterios serán establecidos con el objetivo de mejorar la calidad de la potencia, optimizar el uso del compensador, reducir las pérdidas de potencia, evitar los efectos nocivos que se producen en los sistemas eléctricos, optimizar el uso de la red eléctrica, y minimizar los costos de operación de las redes eléctricas y las cargas. Para cada criterio de selectividad se propondrá un indicador que sirva para valorarlo. También se establecerá un orden o prioridad en el uso de los criterios de selectividad, para lo que se tendrá en cuenta los puntos de vista de la empresa distribuidora de energía y del usuario final.

El capítulo 6 presenta los resultados de simulación. Se efectuarán simulaciones utilizando todas las estrategias de compensación propuestas para un sistema eléctrico que contenga todas las ineficiencias descritas. Se demostrará la efectividad de las diferentes estrategias de compensación propuestas y se evaluarán los criterios de selectividad comparando sus indicadores.

El capítulo 7 presenta los resultados de las pruebas experimentales obtenidas mediante un compensador activo paralelo desarrollado y las cargas disponibles en los laboratorios de investigación de la UPV. Los resultados experimentales obtenidos con los instrumentos disponibles confirman los resultados obtenidos mediante simulación y validan los modelos utilizados.

En el capítulo 8 se relacionan las principales aportaciones de la tesis y expone los trabajos de investigación que pueden derivarse de los resultados obtenidos. Así mismo, en este capítulo se presentan las publicaciones en revistas internacionales de reconocido prestigio que se han derivado como resultados de la tesis.

Finalmente el capítulo 9 incluye las referencias utilizadas en la presente tesis.

1. La última teoría de potencia eléctrica reconocida: La IEEE Std. 1459-2010.

Las definiciones tradicionales de la potencia eléctrica se basan en teorías que fueron establecidas durante la primera mitad del siglo pasado. En los años 20 se postularon los dos enfoques tradicionales de las teorías de la potencia eléctrica. Fryze estableció las definiciones de la potencia eléctrica en el dominio temporal [1]. Por otra parte, Budeanu las estableció en el dominio de la frecuencia utilizando las series de Fourier [2]. En 1950 Buchholz extendió los trabajos de Fryze a sistemas polifásicos [3]. La teoría de Fryze está respaldada por el comité electrotécnico internacional [4], mientras que la de Budeanu encuentra su apoyo fundamental en el Std. 100 de IEEE [5]. En el IEEE Std. 100 se encuentran cerca de 35000 términos técnicos y definiciones para más de 800 Estandars de la sociedad IEEE. Las definiciones de potencia eléctrica que aparecen en el IEEE Std. 100 se utilizan actualmente para la medida y facturación de la potencia en los sistemas eléctricos, y ha sido tomada como base para numerosos estudios realizados por la IEEE.

Durante años estas teorías fueron aceptadas y utilizadas puesto que identificaban fielmente los fenómenos que se producían en los sistemas eléctricos. Sin embargo, a partir de las últimas décadas del siglo pasado se han venido produciendo importantes cambios en los sistemas eléctricos, cambios que pusieron ya entonces de manifiesto que las antiguas formulaciones no ofrecen resultados correctos cuando las tensiones y corrientes son no senoidales y desequilibradas [6]-[8]. Las teorías modernas de la potencia eléctrica aparecen a partir de la década de los 70, siendo en un principio ampliaciones o modificaciones de las teorías clásicas de Fryze y Budeanu [9]-[13].

En 1980 Depenbrock introdujo las bases para el cálculo instantáneo de las corrientes activas con su método llamado FBD en homenaje a Fryze y a Buchholz. En 1983 H. Akagi propone la teoría de la potencia instantánea (o teoría $p-q$) [14] y en 1984, junto con A. Nabae proponen un modelo para obtener, a partir de la potencia instantánea, las potencias activa y reactiva en sistemas trifásicos y las tensiones y corrientes que las producen, permitiendo el control de dispositivos de compensación [15]. La gran aceptación y su amplia utilización en el control de dispositivos de compensación y mejora de la calidad de suministro eléctrico, la han consolidado como una de las teorías de la potencia eléctrica más extendidas. Basándose en la teoría $p-q$ de Akagi han surgido numerosas teorías que proponen diferentes modificaciones sobre la misma. Willems presentó la expansión de la teoría $p-q$ a sistemas polifásicos en 1992 [16]. En 1994 Nabae presentó una modificación de la teoría $p-q$ para que fuese aplicable a sistemas de cuatro hilos [17]. En 1996 Peng y Lai presentaron una generalización de la

potencia reactiva instantánea [18]. En 1999 fueron Kim y el propio Akagi quienes presentaron la teoría $p-q-r$ que expresa las variables de la teoría $p-q$ utilizando una transformación de coordenadas a un sistema de referencia giratorio [19].

En el año 2000, como resultado de los trabajos del “IEEE Working Group in non-sinusoidal situations” [20] se publicó la norma IEEE Std. 1459-2000 en su versión “trial use”, siendo ascendida a “full use” en el año 2002, y en el año 2010 se realiza la última revisión de la norma y se presenta su última versión: el estandar IEEE Std 1459-2010 [21]. En este estándar se incluyen definiciones para las medidas de las magnitudes de potencia de los sistemas eléctricos en condiciones senoidales o no senoidales y equilibradas o desequilibradas. A partir de la potencia aparente efectiva, que es la misma que fue introducida por Buchholz en 1950, se presenta una elegante descomposición de los términos de potencia atendiendo a los fenómenos físicos que las producen. Por esta razón y debido a que la IEEE Std. 1459-2010 recopila los avances producidos en los últimos 50 años en cuanto a la mejor identificación y cuantificación de los fenómenos propios de los sistemas eléctricos, será tomada como base en esta tesis. En la sección 1.1 de este capítulo se resumirá la IEEE Std. 1459-2010.

1.1. Cuantificación de la potencia eléctrica basada en la IEEE Std. 1459-2010.

La IEEE Std. 1459-2010 es la norma en la que se encuentran las definiciones para la cuantificación y medida de las potencias eléctricas bajo condiciones lineales, no lineales, equilibradas y no equilibradas [21]. Las definiciones de potencia que allí aparecen, se basan en la teoría y conocimiento desarrollado desde 1920, siendo de aplicación para sistemas con formas de onda sinusoidales y equilibradas. Sin embargo, debido a los cambios que han ocurrido en los últimos 50 años, ha sido necesario redefinir estas expresiones. El cambio en la topología de los sistemas eléctricos e introducción de nuevas cargas, ha requerido el uso de nuevas definiciones de potencia eléctrica y de nuevas estrategias para la medición de la potencia eléctrica. Las nuevas cargas introducidas en los sistemas eléctricos son cargas no lineales tales como: variadores de velocidad, rectificadores controlados, cicloconvertidores, hornos de arco, hornos de inducción, salas con ordenadores, etc. La conexión de estas cargas generan problemas serios de calidad de la potencia debido a que provocan la circulación de corrientes no senoidales y/o desequilibradas que, a su vez producen caídas de tensión desequilibradas y/o distorsionadas en la red de suministro eléctrico. La instrumentación tradicional diseñada para la medida de formas de onda sinusoidales (50/60 Hz) tiende a producir errores cuando es utilizada para medir ondas de voltaje y corriente distorsionadas. Con el objetivo de mantener en valores apropiados la calidad de la potencia, medir correctamente la distorsión causada por cargas no lineales se ha convertido en una importante necesidad. Por esta razón, actualmente microprocesadores y sistemas de procesamiento de señales se están utilizando para medir variables eléctricas con mayor precisión basándose en modelos matemáticos complejos.

La IEEE Std. 1459-2010 ha tratado de recopilar la información necesaria para caracterizar los sistemas de potencia bajo condiciones lineales, no lineales, equilibradas y desequilibradas. Sin embargo, todavía existen autores que consideran que las definiciones planteadas en este estándar poseen inconsistencias o simplemente las redefinen de otra manera [22]-[27].

La IEEE Std. 1459-2010 desde su primera versión publicada en el 2000 ha empezado a ser usada ampliamente y es tomada como base de diversos estudios e investigaciones. En [28]-[38], la IEEE Std. 1459-2010 es usada en el diseño de instrumentos de medición. En [39]-[40] la IEEE Std. 1459-2010 es usada en el diseño de compensadores y filtros activos.

En la IEEE Std. 1459-2010, los términos de potencia activa, potencia reactiva y potencia aparente son deducidos y están perfectamente definidos para los sistemas monofásicos lineales y para los sistemas trifásicos lineales y equilibrados. Para los sistemas eléctricos no lineales y/o desequilibrados, los términos de potencia eléctrica están definidos pero no son deducidos a partir de ningún desarrollo matemático. Solo a la potencia activa se le ha encontrado significado físico. Otras potencias, sin significado físico, han sido definidas con el objetivo de tomar decisiones económicas, ser una guía en la medida o monitorización de variables eléctricas y cuantificar las diferentes ineficiencias que aparecen en los sistemas eléctricos de potencia. La IEEE Std. 1459-2010 en su análisis considera dos tipos de sistemas eléctricos. En la sección 1.1.1 se resume el estándar para sistemas eléctricos monofásicos, y en la sección 1.1.2 se analiza el estándar de aplicación en sistemas eléctricos trifásicos.

1.1.1. Sistemas eléctricos monofásicos.

La figura 1-1 sirve para representar los sistemas eléctricos monofásicos estudiados en la IEEE Std. 1459-2010. Está conformado por una fuente monofásica de tensión, una carga monofásica, y una línea ideal que conecta la fuente con la carga. La línea ideal está conformada por un conductor de fase y un conductor de neutro. Los conductores de fase y neutro llevan a la carga, la energía que suministra la fuente de tensión. El conductor de fase se encuentra energizado con una tensión alterna y el conductor de neutro sirve como camino en el retorno de la corriente o para cerrar el circuito. En la actualidad los sistemas monofásicos son utilizados en algunos países para suministrar energía a cargas que demandan potencias bajas.

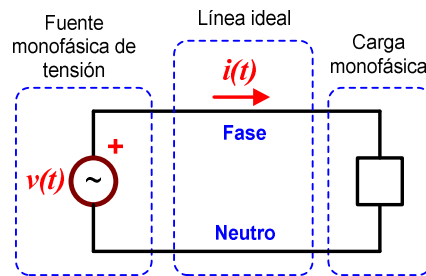


Figura 1-1. Sistema eléctrico monofásico bajo estudio.

La IEEE Std. 1459-2010 contempla dos casos particulares para los sistemas eléctricos monofásicos. El caso que analiza los sistemas eléctricos monofásicos lineales es resumido en la sección 1.1.1.1, y el caso que analiza los sistemas eléctricos monofásicos no lineales es resumido en la sección 1.1.1.2.

1.1.1.1. Sistemas eléctricos monofásicos lineales.

Un sistema eléctrico monofásico lineal es aquel cuyo voltaje y corriente sólo contienen componentes fundamentales. En este caso, la fuente de voltaje de la figura 1-1 suministra a la carga un voltaje instantáneo fundamental ($v_1(t)$), el cual está dado por:

$$v_1(t) = \sqrt{2}V_1 \text{sen}(\omega_1 t + \alpha_1) \quad (1.1)$$

donde:

V_1 : es el voltaje rms fundamental.

ω_1 : es la frecuencia angular fundamental ($\omega_1 = 2\pi f_1$).

t : es el tiempo.

f_1 : es la frecuencia fundamental de suministro.

α_1 : es el ángulo de fase de $v_1(t)$.

Se supone a $v_1(t)$ como referencia para la medida de los ángulos ($\alpha_1 = 0$). La corriente instantánea fundamental ($i_1(t)$) demandada por la carga lineal de la figura 1-1 es:

$$i_1(t) = \sqrt{2}I_1 \text{sen}(\omega_1 t - \beta_1) \quad (1.2)$$

donde:

I_1 : es la corriente rms fundamental.

β_1 : es el ángulo de desfase de $i_1(t)$ con respecto al origen de ángulos $v_1(t)$.

Las expresiones de potencia definidas en la IEEE Std. 1459-2010 para sistemas monofásicos lineales son obtenidas a partir de la potencia instantánea. La potencia instantánea fundamental ($p_1(t)$) corresponde al producto entre $v_1(t)$ e $i_1(t)$. $p_1(t)$ está dado por:

$$p_1(t) = v_1(t)i_1(t) = 2V_1 I_1 \text{sen}(\omega_1 t) \text{sen}(\omega_1 t - \theta_1) \quad (1.3)$$

Donde ($\theta_1 = \beta_1 - \alpha_1 = \beta_1$):

La ecuación (1.3) puede descomponerse con ayuda de la identidad trigonométrica “diferencia de ángulos” como sigue:

$$p_1(t) = 2V_1 I_1 \text{sen}(\omega_1 t) [\text{sen}(\omega_1 t) \cos(\theta_1) - \cos(\omega_1 t) \text{sen}(\theta_1)] \quad (1.4)$$

Operando se tiene:

$$p_1(t) = 2V_1 I_1 \text{sen}^2(\omega_1 t) \cos(\theta_1) - 2V_1 I_1 \text{sen}(\omega_1 t) \cos(\omega_1 t) \text{sen}(\theta_1) \quad (1.5)$$

Utilizando en la ecuación (1.5) la identidad trigonométrica correspondiente al “ángulo doble”, se tiene:

$$p_1(t) = V_1 I_1 \cos(\theta_1) [1 - \cos(2\omega_1 t)] - V_1 I_1 \text{sen}(\theta_1) \text{sen}(2\omega_1 t) \quad (1.6)$$

El primer término de la ecuación (1.6) es la potencia activa instantánea fundamental ($p_{a1}(t)$):

$$p_{a1}(t) = V_1 I_1 \cos(\theta_1) [1 - \cos(2\omega_1 t)] \quad (1.7)$$

$p_{a1}(t)$ puede ser cuantificada con ayuda de la potencia activa fundamental (P_1). P_1 es el valor medio de $p_1(t)$ obtenido en un periodo completo de tiempo:

$$P_1 = \frac{1}{kT} \int_{\tau}^{\tau+kT} p_1(t) dt = V_1 I_1 \cos(\theta_1) \quad (1.8)$$

donde:

τ : es el tiempo inicial o tiempo de referencia donde se inicia el cálculo.

k : es un entero cualquiera para denotar uno de los periodos de tiempo.

t : es el tiempo.

T : es un periodo completo de tiempo de $p_1(t)$.

El segundo término de la ecuación (1.6) es la potencia reactiva instantánea fundamental ($p_{q1}(t)$):

$$p_{q1}(t) = -V_1 I_1 \text{sen}(\theta_1) \text{sen}(2\omega_1 t) \quad (1.9)$$

$p_{q1}(t)$ puede ser cuantificada con la ayuda de la potencia reactiva fundamental (Q_1). Al ser de valor medio nulo Q_1 se define como la amplitud de $p_{q1}(t)$:

$$Q_1 = V_1 I_1 \text{sen}(\theta_1) \quad (1.10)$$

La potencia aparente fundamental (S_1) está dada por:

$$S_1^2 = (V_1 I_1)^2 = P_1^2 + Q_1^2 \quad (1.11)$$

S_1 es la potencia que comúnmente es utilizada para dimensionar los sistemas eléctricos, ya que es la potencia que deben suministrar las fuentes para suplir las necesidades de la carga. En este caso, S_1 está compuesta por P_1 y Q_1 . La potencia P_1 corresponde a la potencia eficiente demandada por la carga, mientras que Q_1 es la potencia ineficiente demandada por la carga. El factor de potencia fundamental (P_{F1}) relaciona a P_1 con S_1 y sirve para evaluar el flujo de potencia fundamental.

$$P_{F1} = \frac{P_1}{S_1} \quad (1.12)$$

1.1.1.2. Sistemas eléctricos monofásicos no lineales.

Los sistemas eléctricos monofásicos no lineales son aquellos cuyos voltajes y corrientes contienen componentes fundamentales y no fundamentales de frecuencia. Las corrientes no fundamentales se deben, principalmente, al uso de cargas no lineales. Los voltajes no fundamentales se deben, principalmente, a la presencia de fuentes distorsionadas de tensión. En este caso el voltaje instantáneo ($v(t)$) de la figura 1-1 está conformado por $v_1(t)$ y por el voltaje instantáneo no fundamental ($v_H(t)$) (Siguiendo la nomenclatura de la IEEE Std. 1459-2010, el subíndice H es utilizado para indicar que la variable contiene componentes armónicas. No se debe confundir con el subíndice h que indica el orden del armónico).

$$v(t) = v_1(t) + v_H(t) = \sqrt{2}V_1 \text{sen}(\omega_1 t + \alpha_1) + \sqrt{2} \sum_{h \neq 1}^{\infty} V_h \text{sen}(h\omega_1 t - \alpha_h) \quad (1.13)$$

donde,

h : es el orden del armónico ($h=2,3,4,\dots,\infty$).

V_h : es el voltaje rms de la componente h -ésima de voltaje.

α_h : es el ángulo de la componente h -ésima de voltaje con respecto a $v_1(t)$, ($\alpha_1=0$).

De la misma manera, la corriente instantánea ($i(t)$) está conformada por $i_1(t)$ y por la corriente instantánea no fundamental ($i_H(t)$):

$$i(t) = i_1(t) + i_H(t) = \sqrt{2}I_1 \text{sen}(\omega_1 t - \beta_1) + \sqrt{2} \sum_{h \neq 1}^{\infty} I_h \text{sen}(h\omega_1 t - \beta_h) \quad (1.14)$$

donde,

I_h : es la corriente rms de la componente h -sima de corriente.

β_h : es el ángulo de la componente h -sima de corriente con respecto a $v_1(t)$.

El voltaje rms cuadrático (V^2) está dado por:

$$V^2 = \frac{1}{kT} \int_{\tau}^{\tau+kT} v(t)^2 dt = V_1^2 + V_H^2 \quad (1.15)$$

La corriente rms cuadrática (I^2) está dada por:

$$I^2 = \frac{1}{kT} \int_{\tau}^{\tau+kT} i(t)^2 dt = I_1^2 + I_H^2 \quad (1.16)$$

El voltaje rms armónico y cuadrático (V_H^2) está dado por:

$$V_H^2 = \sum_{h \neq 1}^{\infty} V_h^2 = V^2 - V_1^2 \quad (1.17)$$

La corriente rms armónica y cuadrática (I_H) está dada por:

$$I_H^2 = \sum_{h \neq 1}^{\infty} I_h^2 = I^2 - I_1^2 \quad (1.18)$$

La potencia instantánea $p(t)$ está dada por:

$$p(t) = v(t)i(t) \quad (1.19)$$

Así como en el caso monofásico lineal $p(t)$ está dividido en $p_a(t)$ y $p_q(t)$:

$$p_a(t) = \sum_{h=1}^{\infty} V_h I_h \cos \theta_h [1 - \cos(2h\omega t)] \quad (1.20)$$

$$p_q(t) = \sum_{h=1}^{\infty} V_h I_h \sin \theta_h \sin(2h\omega t) + \sum_{\substack{m \neq n \\ m, n \neq 1}}^{\infty} 2V_m I_n \sin(m\omega t + \alpha_m) \sin(n\omega t + \beta_n) \quad (1.21)$$

donde,

m : es el orden de las componentes armónicas de voltaje.

n : es el orden de las componentes armónicas de corriente.

θ_h : es la diferencia de ángulos entre las corrientes (β_h) y tensiones (α_h) del mismo orden armónico ($\theta_h = \beta_h - \alpha_h$).

La potencia activa (P) es el valor medio de $p(t)$:

$$P = \frac{1}{kT} \int_{\tau}^{\tau+kT} p(t) dt = P_1 + P_H \quad (1.22)$$

P_H es la potencia activa armónica y está dada por:

$$P_H = \sum_{h \neq 1}^{\infty} V_h I_h \cos(\theta_h) = P - P_1 \quad (1.23)$$

La potencia reactiva (Q) está dada por:

$$Q = Q_1 + Q_H \quad (1.24)$$

Q_H es la potencia reactiva armónica y está dada por:

$$Q_H = \sum_{h \neq 1}^{\infty} V_h I_h \sin(\theta_h) \quad (1.25)$$

La potencia aparente (S) está definida como sigue:

$$S = VI \quad (1.26)$$

Reemplazando las ecuaciones (1.15) y (1.16) en (1.26) y elevando toda la expresión al cuadrado para facilitar el desarrollo matemático se tiene:

$$S^2 = (V_1^2 + V_H^2)(I_1^2 + I_H^2) \quad (1.27)$$

Expandiendo S se puede ver los términos de potencia que la componen.

$$S^2 = (V_1 I_1)^2 + (V_1 I_H)^2 + (V_H I_1)^2 + (V_H I_H)^2 \quad (1.28)$$

El primer término de la ecuación (1.28) es S_1 mientras que el resto de términos son la potencia aparente no fundamental (S_N):

$$S_N^2 = (V_1 I_H)^2 + (V_H I_1)^2 + (V_H I_H)^2 \quad (1.29)$$

A su vez S_N se divide en la potencia de distorsión de corriente (D_I), la potencia de distorsión de voltaje (D_V), y la potencia armónica aparente (S_H):

$$D_I^2 = (V_1 I_H)^2 \quad (1.30)$$

$$D_V^2 = (V_H I_1)^2 \quad (1.31)$$

$$S_H^2 = (V_H I_H)^2 \quad (1.32)$$

La potencia aparente armónica residual (D_H) es el término de la potencia armónica aparente que contiene a Q_H y todos los términos de potencia de productos cruzados de distinto orden. D_H está definida como sigue:

$$D_H^2 = S_H^2 - P_H^2 \quad (1.33)$$

La distorsión armónica total de voltaje (THD_V) y la distorsión armónica total de corriente (THD_I) son respectivamente las expresiones (1.34) y (1.35).

$$THD_V = \frac{V_H}{V_1} = \sqrt{\left(\frac{V}{V_1}\right)^2} - 1 \quad (1.34)$$

$$THD_I = \frac{I_H}{I_1} = \sqrt{\left(\frac{I}{I_1}\right)^2} - 1 \quad (1.35)$$

1.1.2. Sistemas eléctricos trifásicos.

Los sistemas de transmisión y distribución de mayor utilización son los sistemas trifásicos. En la IEEE Std. 1459-2010 se diferencian dos tipos de configuraciones en este tipo de sistemas: el sistema trifásico a tres hilos (sin neutro) y el sistema trifásico a 4 hilos (con neutro). En la tesis, se estudiará el sistema trifásico a 4 hilos, ya que es un sistema más general en redes de distribución y sus expresiones de potencia definidas en el estándar presentan discordancias entre varios autores [22]-[26]. Todas las ecuaciones resumidas en este capítulo y deducidas en otros capítulos hacen referencia a los sistemas trifásicos a 4 hilos a menos que se indique lo contrario. La figura 1-2 representa un sistema eléctrico trifásico a 4 hilos, está conformado por una fuente de tensión trifásica genérica, y una carga trifásica genérica, las cuales están conectadas a través de una línea con resistencia serie (r) para modelar las pérdidas por conducción, y con resistencias (R_Y) y (R_Δ) para modelar las pérdidas por dispersión en derivación. Dependiendo del caso a analizar, la fuente de tensión trifásica genérica puede estar compuesta por tensiones simétricas o asimétricas y por tensiones fundamentales y/o no fundamentales. De la misma manera, la carga trifásica genérica puede demandar corrientes fundamentales y/o no fundamentales, equilibradas o desequilibradas, y reactivas. Se despreciará la caída de tensión en los conductores de alimentación referenciando los voltajes en el punto de conexión común o pcc (punto abc).

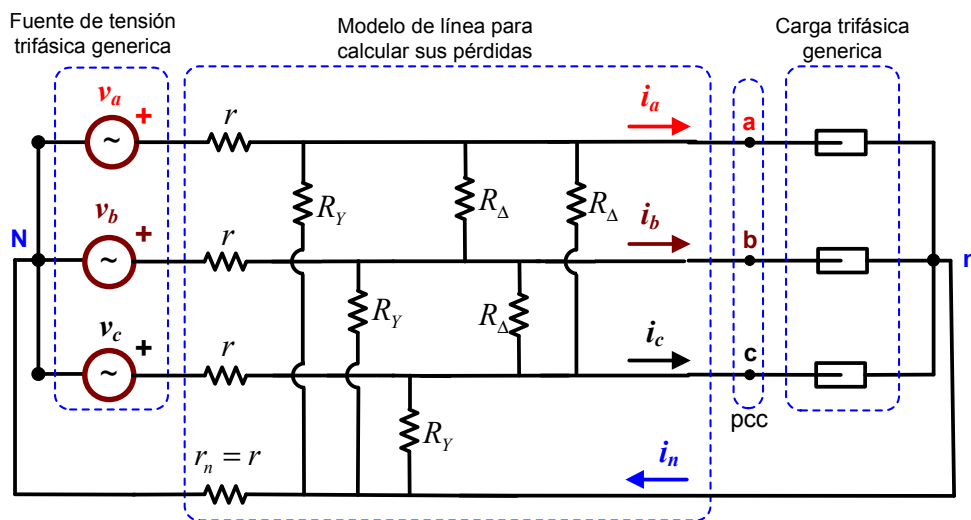


Figura 1-2. Sistema eléctrico trifásico a 4 hilos.

Para obtener el voltaje efectivo (V_e) de un sistema trifásico a 4 hilos, la IEEE Std. 1459 emplea las pérdidas de potencia por dispersión en derivación (asociadas a la tensión) teniendo en cuenta que las pérdidas producidas entre fases y neutro (P_Y) son iguales a las pérdidas producidas entre fases (P_Δ).

Para un sistema de conexión estrella (Y), las pérdidas equivalentes (P_Y) de un sistema de tensiones no simétrico correspondientes a un sistema de tensiones simétrico son:

$$P_Y = \frac{V_a^2 + V_b^2 + V_c^2}{R_Y} = \frac{3V_e^2}{R_Y} \quad (1.36)$$

Donde, V_a , V_b , y V_c son los valores rms del voltaje para las fases a , b , y c respectivamente. R_Y es la resistencia equivalente de línea de distribución para un sistema de conexión estrella. De la misma manera las pérdidas de potencia (P_Δ) para un sistema de conexión delta (Δ) son:

$$P_\Delta = \frac{V_{ab}^2 + V_{bc}^2 + V_{ca}^2}{R_\Delta} = \frac{3(\sqrt{3}V_e)^2}{R_\Delta} \quad (1.37)$$

Donde V_{ab} , V_{bc} , y V_{ca} son los valores rms de los voltajes línea-línea y R_Δ es la resistencia equivalente para un sistema de conexión delta.

Sumando las ecuaciones (1.36) y (1.37) y reemplazando $R_\Delta = 3R_Y$ se tiene:

$$\frac{V_a^2 + V_b^2 + V_c^2}{R_Y} + \frac{V_{ab}^2 + V_{bc}^2 + V_{ca}^2}{3R_Y} = \frac{3V_e^2}{R_Y} + \frac{3(\sqrt{3}V_e)^2}{3R_Y} \quad (1.38)$$

Despejando de la ecuación (1.38), en (1.39) se obtiene la expresión general de V_e para sistemas trifásicos a 4 hilos (Willems en [26] extiende los cálculos para otras configuraciones):

$$V_e = \sqrt{\frac{1}{18} [3(V_a^2 + V_b^2 + V_c^2) + (V_{ab}^2 + V_{bc}^2 + V_{ca}^2)]} \quad (1.39)$$

De manera similar, para obtener la corriente efectiva (I_e) de un sistema trifásico de cuatro hilos, la IEEE Std. 1459-2010 basa el cálculo en las pérdidas de potencia en las líneas de la red del sistema de distribución (ΔP):

$$\Delta P = r(I_a^2 + I_b^2 + I_c^2) + r_n I_n^2 \quad (1.40)$$

Donde r es la resistencia de los conductores de fase; r_n la resistencia del conductor de neutro; I_a , I_b , y I_c son los valores rms de la corriente para las fases a , b , y c respectivamente; e I_n es el valor rms de la corriente que circula por el neutro. Para simplificar los cálculos la IEEE Std. 1459-2010 asume $r_n = r$ (Williens extiende los cálculos de I_e en [26] para la $r_n \neq r$ y otras configuraciones):

$$\Delta P = r(I_a^2 + I_b^2 + I_c^2 + I_n^2) \quad (1.41)$$

Para cualquier conjunto de corrientes desequilibradas, existe un sistema equilibrado equivalente que provoca las mismas pérdidas de potencia en las líneas. En este sistema equilibrado se cumple que $I_a = I_b = I_c = I_e$ e $I_n = 0$, en estas circunstancias las pérdidas se obtienen en (1.42).

$$\Delta P = 3rI_e^2 \quad (1.42)$$

Igualando (1.41) y (1.42) se obtiene la expresión general de I_e :

$$I_e = \sqrt{\frac{1}{3}(I_a^2 + I_b^2 + I_c^2 + I_n^2)} \quad (1.43)$$

La potencia aparente efectiva (S_e) es definida de la siguiente manera:

$$S_e = 3V_e I_e \quad (1.44)$$

En teoría S_e representa todos los fenómenos físicos que pueden aparecer en el sistema de potencia. S_e incluye las pérdidas en el conductor de neutro en un sistema trifásico de cuatro hilos así como el fenómeno del desequilibrio. S_e es la máxima potencia activa que puede ser transmitida por un sistema de distribución trifásico a una carga trifásica perfectamente equilibrada, alimentada por un sistema de tensiones con una tensión efectiva igual a V_e , manteniendo las mismas pérdidas en las líneas.

Las expresiones de V_e , I_e , y S_e acabadas de deducir corresponden al caso general. En los siguientes apartados se resumen las ecuaciones de la IEEE Std. 1459-2010 bajo ciertas condiciones particulares. En la sección 1.1.2.1 se resumen las ecuaciones para sistemas trifásicos lineales equilibrados, en la sección 1.1.2.2 se resumen las ecuaciones para sistemas trifásicos lineales desequilibrados, y en la sección 1.1.2.3 se resumen las ecuaciones para los sistemas trifásicos no lineales desequilibrados.

1.1.2.1. Sistema eléctrico trifásico lineal y equilibrado.

En esta situación, en el sistema eléctrico de la figura 1-2, la tensión de suministro es simétrica y fundamental ($V_{a1} = V_{b1} = V_{c1} = V_1^+$), el superíndice “+” indica que el valor rms de las tensiones por fase solo contienen valores de secuencia positiva. Las tensiones instantáneas fundamental por fase ($v_{z1}(t)$) en el pcc pueden verse en la siguiente ecuación:

$$v_{z1}(t) = v_{z1}^+(t) = \sqrt{2}V_1^+ \sin(\omega t - \varphi_z) \quad (1.45)$$

donde,

z : es el subíndice que indica las fases del sistema eléctrico ($z=a, b, c$).

φ_z : es la fase inicial de los voltajes línea-neutro ($\varphi_a=0, \varphi_b=2\pi/3, \varphi_c=4\pi/3$).

$v_{a1}(t)$ es tomado como la referencia de los ángulos (0°), así que todos los ángulos de los voltajes y corrientes son medidos con respecto a él. La corriente que demanda la carga es equilibrada y fundamental ($I_{a1}=I_{b1}=I_{c1}=I_1^+$), por lo que, la corriente que circula por el conductor de neutro es nula ($I_n=0$). Las corrientes instantáneas fundamentales por fase ($i_{z1}(t)$) están dadas por:

$$i_{z1}(t) = i_{z1}^+(t) = \sqrt{2}I_1^+ \sin(\omega t - \varphi_z + \beta_1^+) \quad (1.46)$$

Donde β_1^+ es el ángulo de desfase de las corrientes con respecto a los voltajes. Si β_1^+ es positivo la corriente está adelantada con respecto al voltaje y es provocada por cargas capacitivas. Si β_1^+ es negativo la corriente se encuentra atrasada con respecto al voltaje y es provocada por cargas inductivas.

La potencia instantánea trifásica fundamental ($p(t)$), es la suma de la contribución de la potencia instantánea de cada fase y está dada por:

$$p(t) = v_a(t)i_a(t) + v_b(t)i_b(t) + v_c(t)i_c(t) \quad (1.47)$$

La única expresión de potencia instantánea para este caso que aparece en la norma, es la expresión (1.47) y solo es usada para calcular la potencia activa (P). P en este caso coincide con la potencia activa de secuencia positiva (P_1^+) y es cuantificada calculando el valor medio de $p(t)$ como sigue:

$$P = P_1^+ = \frac{1}{kT} \int_{\tau}^{\tau+kT} p(t) dt = 3V_1^+ I_1^+ \cos \theta_1^+ \quad (1.48)$$

Donde θ_1^+ es el ángulo de desfase entre el voltaje y la corriente ($\theta_1^+ = \beta_1^+ - \alpha_1^+$). P_1^+ es la única potencia activa que es considerada eficiente, ya que en su totalidad es transferida desde de la fuente hacia la carga. La potencia reactiva que en este caso coincide con la potencia reactiva de secuencia positiva (Q_1^+) es:

$$Q_1^+ = 3V_1^+ I_1^+ \sin \theta_1^+ \quad (1.49)$$

S_e en este caso coincide con la potencia aparente fundamental de secuencia positiva (S_1^+) y puede calcularse a partir de la ecuación (1.44) o como sigue:

$$S_e^2 = (S_1^+)^2 = (P_1^+)^2 + (Q_1^+)^2 = (3V_1^+ I_1^+)^2 \quad (1.50)$$

El factor de potencia fundamental de secuencia positiva relaciona a P_1^+ con S_1^+ :

$$P_{F1}^+ = \frac{P_1^+}{S_1^+} \quad (1.51)$$

P_{F1}^+ es usado como indicador de la eficiencia de este tipo de sistemas, ya que indica la proporción de la potencia entregada a la carga que es aprovechada realmente.

1.1.2.2. Sistema eléctrico trifásico lineal y desequilibrado.

En este caso representado en la figura 1-3, las magnitudes de voltaje en el pcc son fundamentales pero no son iguales ($V_{a1} \neq V_{b1} \neq V_{c1}$). Para este caso $v_{z1}(t)$ en el pcc puede verse en la siguiente ecuación:

$$v_{z1}(t) = \sqrt{2}V_{z1} \text{sen}(\omega_1 t - \varphi_z) \quad (1.52)$$

La corriente de fase es senoidal, fundamental, y desequilibrada ($I_{a1} \neq I_{b1} \neq I_{c1}$), y la corriente que circula por el conductor de neutro no es nula ($I_N \neq 0$), i_{z1} está dada por:

$$i_{z1}(t) = \sqrt{2}I_{z1} \text{sen}(\omega_1 t - \varphi_z + \beta_{z1}) \quad (1.53)$$

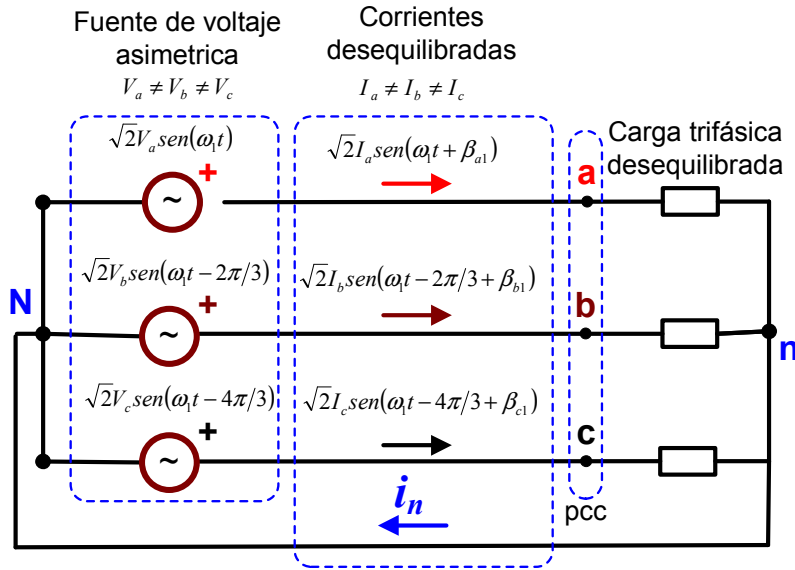


Figura 1-3. Sistema eléctrico trifásico a 4 hilos lineal y desequilibrado.

Usando teorema de Stokvis-Fortesque [41], las componentes simétricas para las tensiones son:

- El voltaje fundamental de secuencia positiva (V_1^+).
- El voltaje fundamental de secuencia negativa (V_1^-).
- El voltaje fundamental de secuencia cero (V_1^0).

V_e en este caso coincide con el voltaje efectivo fundamental (V_{e1}) y puede calcularse en términos de las componentes simétricas como sigue:

$$V_e = V_{e1} = \sqrt{(V_1^+)^2 + (V_1^-)^2 + \frac{(V_1^0)^2}{2}} \quad (1.54)$$

Debido a que las magnitudes de corrientes tampoco son iguales, estas también pueden expresarse en términos de las componentes simétricas:

- La corriente fundamental de secuencia positiva (I_1^+).
- La corriente fundamental de secuencia negativa (I_1^-).
- La corriente fundamental de secuencia cero (I_1^0).

I_e coincide con la corriente efectiva fundamental (I_{e1}) y puede calcularse en términos de las componentes simétricas como sigue:

$$I_e = I_{e1} = \sqrt{(I_1^+)^2 + (I_1^-)^2 + 4(I_1^0)^2} \quad (1.55)$$

S_e coincide con la potencia aparente fundamental (S_{e1}). S_{e1} está compuesto por S_1^+ y por la potencia aparente desequilibrada (S_{U1}). S_{U1} contiene todas las componentes de potencia provocadas por voltajes asimétricos o corrientes desequilibradas:

$$(S_e)^2 = (S_{e1})^2 = (S_1^+)^2 + (S_{U1})^2 \quad (1.56)$$

La potencia aparente fundamental de secuencia negativa (S_1^-), y la potencia aparente fundamental de secuencia de secuencia cero (S_1^0) son parte de S_{U1} , sus expresiones son mostradas en las ecuaciones (1.57) y (1.58) respectivamente:

$$(S_1^-)^2 = (P_1^-)^2 + (Q_1^-)^2 \quad (1.57)$$

$$(S_1^0)^2 = (P_1^0)^2 + (Q_1^0)^2 \quad (1.58)$$

La potencia activa fundamental de secuencia negativa (P_1^-), y la potencia fundamental de secuencia cero (P_1^0) son mostradas en las ecuaciones (1.59) y (1.60) respectivamente:

$$P_1^- = 3V_1^- I_1^- \cos \theta_1^- \quad (1.59)$$

$$P_1^0 = 3V_1^0 I_1^0 \cos \theta_1^0 \quad (1.60)$$

A pesar de que P_1^- y P_1^0 son provocados por componentes de voltaje y corriente de la misma secuencia de rotación, estas son consideradas ineficientes, ya que se derivan de un fenómeno ineficiente y ocasionan pérdidas en las líneas y transformadores [39].

La potencia reactiva fundamental de secuencia negativa (Q_1^-) y la potencia reactiva de secuencia cero (Q_1^0) son mostradas en (1.61) y (1.62) respectivamente:

$$Q_1^- = 3V_1^- I_1^- \sin \theta_1^- \quad (1.61)$$

$$Q_1^0 = 3V_1^0 I_1^0 \sin \theta_1^0 \quad (1.62)$$

1.1.2.3. Sistema eléctrico trifásico no lineal con voltajes asimétricos y corrientes desequilibradas.

Este caso, corresponde al caso más genérico presentado en la IEEE Std. 1459-2010. Incluye a los sistemas eléctricos, cuyas tensiones son asimétricas y distorsionadas, y cuyas corrientes son desequilibradas y distorsionadas. Los voltajes instantáneos fase-neutro ($v_z(t)$) en el pcc se muestran en la figura 1-4 y están definidos por:

$$v_z(t) = \sqrt{2}V_{z1} \text{sen}(\omega_1 t - \varphi_z) + \sqrt{2} \sum_{h \neq 1}^{\infty} V_{zh} \text{sen}(h(\omega_1 t - \varphi_z) + \alpha_{zh}) \quad (1.63)$$

donde,

V_{zh} : es el voltaje rms de la componente h -ésima de voltaje de fase a neutro.

α_{zh} : es el ángulo de la componente h -ésima de voltaje de fase a neutro con respecto a $v_{a1}(t)$, ($\alpha_1=0$).

En este caso, los voltajes rms fundamentales son diferentes ($V_{a1} \neq V_{b1} \neq V_{c1}$), también los voltajes rms para cada armónico son diferentes ($V_{ah} \neq V_{bh} \neq V_{ch}$).

Las corrientes de línea instantánea por fase ($i_z(t)$) están definidas por:

$$i_z = \sqrt{2}I_{z1} \sin(\omega_1 t - \varphi_z + \beta_{z1}) + \sqrt{2} \sum_{h \neq 1}^{\infty} I_{zh} \sin(h(\omega_1 t - \varphi_z) + \beta_{zh}) \quad (1.64)$$

donde,

I_{zh} : es el corriente rms de la componente h -sima de corriente de línea por fase.

β_{zh} : es el ángulo de desfase de la componente h -sima de voltaje de fase a neutro con respecto a $v_{a1}(t)$, ($\alpha_1=0$).

En este caso, las corrientes rms fundamentales son diferentes ($I_{a1} \neq I_{b1} \neq I_{c1}$), también las corrientes rms para cada armónico son diferentes ($I_{ah} \neq I_{bh} \neq I_{ch}$).

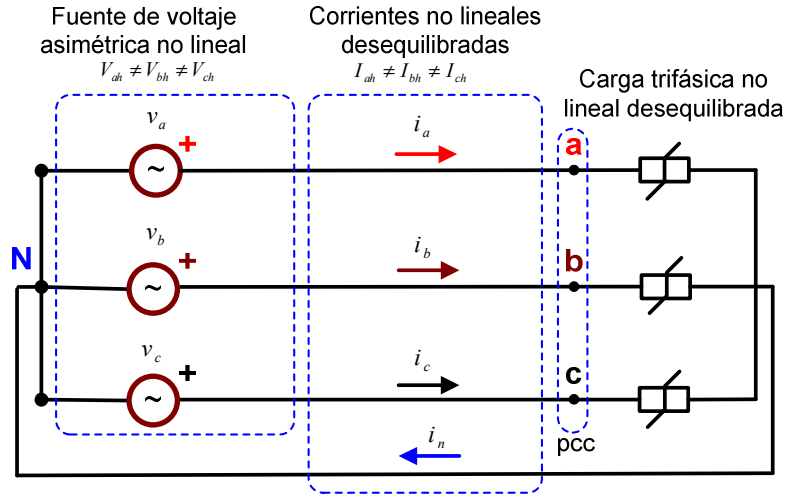


Figura 1-4. Sistema eléctrico trifásico a 4 hilos no lineal y desequilibrado.

El voltaje efectivo no fundamental (V_{eH}) está conformado por todas las componentes armónicas de voltaje y puede calcularse a partir de la ecuación (1.39) como sigue:

$$V_{eH} = \sqrt{\frac{1}{18} [3(V_{aH}^2 + V_{bH}^2 + V_{cH}^2) + (V_{abH}^2 + V_{bcH}^2 + V_{caH}^2)]} \quad (1.65)$$

Donde V_{aH} , V_{bH} y V_{cH} son los voltajes rms armónicos y cuadráticos de fase-neutro medidos en el pcc, (V_{abH} , V_{bcH} y V_{caH}) son los voltajes rms armónicos y cuadráticos de línea a línea en el pcc. V_e está conformado por V_{e1} y por V_{eH} como sigue:

$$V_e = \sqrt{V_{e1}^2 + V_{eH}^2} \quad (1.66)$$

La corriente efectiva no fundamental (I_{eH}) está conformada por todas las componentes armónicas de corriente y puede calcularse a partir de la ecuación (1.43) como sigue:

$$I_{eH} = \sqrt{\frac{1}{3} (I_{aH}^2 + I_{bH}^2 + I_{cH}^2 + I_{nH}^2)} \quad (1.67)$$

Donde I_{aH} , I_{bH} e I_{cH} son las corrientes rms armónicas y cuadráticas por fase; I_{nH} es la corriente rms armónica y cuadrática del neutro. I_e está conformado por I_{e1} y por I_{eH} como sigue:

$$I_e = \sqrt{I_{e1}^2 + I_{eH}^2} \quad (1.68)$$

Cabe anotar que debido a que los voltajes son asimétricos y las corrientes son desequilibradas, V_{e1} , V_{eH} , I_{e1} , e I_{eH} , pueden expresarse en términos de las componentes simétricas. Ésta afirmación es útil para aclarar la naturaleza de los diferentes términos de potencia en análisis posteriores.

S_e puede obtenerse si las ecuaciones (1.66) y (1.68) son reemplazadas en la ecuación (1.44).

$$S_e^2 = 9(V_{e1}^2 + V_{eH}^2) (I_{e1}^2 + I_{eH}^2) \quad (1.69)$$

Expandiendo la ecuación (1.69) se obtiene:

$$S_e^2 = (3V_{e1}I_{e1})^2 + (3V_{e1}I_{eH})^2 + (3V_{eH}I_{e1})^2 + (3V_{eH}I_{eH})^2 \quad (1.70)$$

El primer término de la ecuación (1.70) es S_{e1} y el resto de términos componen la potencia aparente no fundamental (S_{eN}). La potencia S_{eN} , de manera análoga al caso monofásico, está formada por todas las clases de potencias que contienen voltajes y/o corrientes no fundamentales:

$$S_{eN}^2 = S_e^2 - S_{e1}^2 = (3V_{e1}I_{eH})^2 + (3V_{eH}I_{e1})^2 + (3V_{eH}I_{eH})^2 \quad (1.71)$$

Los términos que aparecen en S_{eN} están definidos en la IEEE Std. 1459-2010. El primer término es la potencia debida a la distorsión de corriente (D_{eI}):

$$D_{eI}^2 = (3V_{e1}I_{eH})^2 \quad (1.72)$$

El segundo término es la potencia debida a la distorsión armónica de voltaje (D_{eV}):

$$D_{eV}^2 = (3V_{eH}I_{e1})^2 \quad (1.73)$$

El tercer término es la potencia armónica aparente (S_{eH}). S_{eH} está compuesto por la potencia activa armónica (P_H) y la potencia armónica de distorsión (D_{eH}), como sigue:

$$S_{eH}^2 = P_H^2 + D_{eH}^2 = (3V_{eH}I_{eH})^2 \quad (1.74)$$

P_H es una potencia activa considerada ineficiente debido a que proviene de un fenómeno ineficiente y provoca pérdidas en la carga y en el sistema eléctrico de potencia [39]:

$$P_H = 3 \sum_{h \neq 1} V_h I_h \cos \theta_h \quad (1.75)$$

La potencia reactiva (Q_H) está definida en la ecuación (1.76):

$$Q_H = 3 \sum_{h \neq 1} V_h I_h \sin \theta_h \quad (1.76)$$

El factor de potencia efectivo (P_{Fe}) está dado por:

$$P_{Fe} = \frac{P}{S_e} \quad (1.77)$$

La distorsión armónica total equivalente de voltaje (THD_{eV}) está dada por:

$$THD_{eV} = \frac{V_{eH}}{V_{e1}} \quad (1.78)$$

La distorsión armónica total equivalente de corriente (THD_{eI}) está dada por:

$$THD_{el} = \frac{I_{eH}}{I_{e1}} \quad (1.79)$$

Un sistema eléctrico trifásico no lineal con voltajes simétricos y corrientes equilibradas es un caso particular de la presente sección, de esta manera, las ecuaciones (1.65) a (1.77), explican este caso con claridad, solamente hay que realizar algunas observaciones:

- En las ecuaciones donde aparezca V_{el} , V_{el} equivale a V_1^+ ya que en este caso no existen V_1^- y V_1^0 .
- En las ecuaciones donde aparezca I_{el} , I_{el} equivale a I_1^+ ya que en este caso no existen I_1^- y I_1^0 .
- Debido a que sólo existen componentes de secuencia positiva de voltaje y corriente fundamental S_{e1} es equivalente a S_1^+ .

1.2. Análisis y aportaciones de la teoría de la potencia eléctrica IEEE Std. 1459-2010.

En la sección 1.1 se explica la división de las potencias eléctricas realizadas por la IEEE Std. 1459-2010 para los sistemas trifásicos a 4 hilos. En la figura 1-5 puede verse el resumen de esta división.

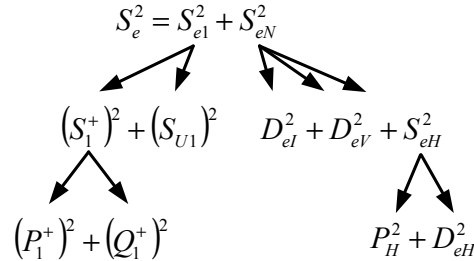


Figura 1-5. Esquema de potencias propuesta por la IEEE Std. 1459-2010.

La cuantificación de potencia realizada por la IEEE Std. 1459-2010 se resume a continuación:

- La potencia aparente efectiva (S_e) cuantifica el conjunto de todas las potencias (eficientes e ineficientes que demanda la carga). S_e se divide en la potencia aparente efectiva fundamental (S_{e1}) y la potencia aparente efectiva no fundamental (S_{eN}).
- S_{e1} cuantifica los fenómenos de potencia eléctrica provocados por las componentes fundamentales de voltaje y corriente. S_{e1} se divide en la potencia aparente fundamental de secuencia positiva (S_1^+) y en la potencia de desequilibrio fundamental (S_{U1}).
- S_1^+ cuantifica los fenómenos de potencia eléctrica provocados por las componentes fundamentales de secuencia positiva de voltaje y corriente. S_1^+ se divide en la potencia activa fundamental de secuencia positiva (P_1^+) y en la potencia reactiva fundamental de secuencia positiva (Q_1^+).
- P_1^+ cuantifica la transferencia útil de potencia desde la fuente a la carga, por lo que es considerada la única potencia que es considerada eficiente.
- Q_1^+ cuantifica los fenómenos de potencia eléctrica relacionados con el desfase de I_1^+ con respecto a V_1^+ .
- S_{U1} cuantifica los fenómenos de potencia eléctrica provocados por las componentes de voltaje asimétricas y por las componentes de corriente desequilibradas.
- S_{eN} cuantifica los fenómenos de potencia eléctrica provocados por componentes no fundamentales de voltaje y corriente. S_{eN} se divide en la potencia de distorsión de

corriente (D_{el}), en la potencia de distorsión de voltaje (D_{eV}), y en la potencia aparente armónica (S_{eH}).

- D_{el} cuantifica los fenómenos de potencia eléctrica provocados por las corrientes no fundamentales.
- D_{eV} cuantifica los fenómenos de potencia eléctrica provocados por los voltajes no fundamentales.
- S_{eH} cuantifica los fenómenos de potencia eléctrica provocados por los voltajes y corrientes no fundamentales. S_{eH} se divide en la potencia activa armónica (P_H) y en la potencia aparente armónica residual (D_{eH}).

1.2.1. Extensión de la división de las potencias eléctricas de la IEEE Std. 1459-2010: Extensión de la potencia de desequilibrio fundamental.

La IEEE Std. 1459-2010 no propone una división que distinga claramente todos los términos de potencia de S_{U1} . Los autores en [23] proponen una nueva división de S_{U1} . Esta división es resumida en esta tesis, ya que será de utilidad para explicar los flujos de potencia de los sistemas eléctricos y de los compensadores activos. S_{U1} incluye tanto los desequilibrios ocasionados por las tensiones como los ocasionados por las corrientes. Por lo que, S_{U1} no es un término que sirva para distinguir los fenómenos de potencia eléctrica provocados por el usuario o por el operador de red. Para explicar la nueva extensión de las potencias IEEE Std. 1459-2010, los autores en [23] parten de la expresión de S_{e1} siguiendo el mismo procedimiento que usan en la IEEE Std. 1459-2010 para obtener las componentes de potencia de S_{eN} . La potencia S_{e1} puede ser expresada como una función de V_{e1} e I_{e1} , o como la suma cuadrática de las potencias fundamentales tal y como se muestra en la ecuación (1.80).

$$(S_{e1})^2 = (3V_{e1}I_{e1})^2 = (P_1^+)^2 + (Q_1^+)^2 + (S_{U1})^2 \quad (1.80)$$

El valor de S_{U1} , es calculado a partir de la ecuación (1.80) y mostrado en la ecuación (1.81).

$$(S_{U1})^2 = (S_{e1})^2 - (P_1^+)^2 - (Q_1^+)^2 = (S_{e1})^2 - (S_1^+)^2 \quad (1.81)$$

Para el cálculo de los nuevos términos de potencia se parte de una nueva descomposición de V_{e1} e I_{e1} . Se separan las componentes fundamentales de secuencia positiva (V_1^+ , e I_1^+) del resto de componentes. El resto de componentes, conformadas por componentes de secuencia negativa y componentes de secuencia cero, quedan englobadas en dos nuevos términos que son:

- La corriente de desequilibrio fundamental (I_{U1}).
- El voltaje de desequilibrio fundamental (V_{U1}).

V_{e1} e I_{e1} se pueden expresar de la siguiente manera.

$$(V_{e1})^2 = (V_1^+)^2 + (V_{U1})^2 \quad (1.82)$$

$$(I_{e1})^2 = (I_1^+)^2 + (I_{U1})^2 \quad (1.83)$$

S_1^+ es calculada usando V_1^+ , e I_1^+ , con lo que se puede obtener la ecuación (1.84)

$$(S_{U1})^2 = (S_{e1})^2 - (S_1^+)^2 = (S_{e1})^2 - (3 \cdot V_1^+ I_1^+)^2 \quad (1.84)$$

Despejando los valores de V_1^+ , e I_1^+ en las ecuaciones (1.82) y (1.83), y sustituyendo en la ecuación (1.84) el valor de S_{U1} puede escribirse de la siguiente manera:

$$S_{U1}^2 = S_{e1}^2 - 9(V_{e1}^2 - V_{U1}^2) \cdot (I_{e1}^2 - I_{U1}^2) \quad (1.85)$$

Resolviendo S_{e1} como una función de V_{e1} e I_{e1} , S_{U1} puede escribirse como sigue:

$$S_{U1}^2 = (3 \cdot V_{e1} I_{U1})^2 + (3 \cdot V_{U1} I_{e1})^2 - (3 \cdot V_{U1} I_{U1})^2 \quad (1.86)$$

S_{U1} puede escribirse en función de tres nuevos términos:

- La potencia de desequilibrio de corriente (S_{U1I}): corresponde al primer término de la ecuación (1.86), representa el desequilibrio provocado por las corrientes desequilibradas demandadas por la carga. S_{U1I} se calcula como el producto de V_{e1} y de I_{U1} , y cuantifica la parte de S_{U1} debido al desequilibrio de la corriente fundamental demandada por el usuario:

$$S_{U1I} = 3V_{e1}I_{U1} \quad (1.87)$$

- La potencia de desequilibrio de tensión (S_{U1V}): corresponde al segundo término de la ecuación (1.86), representa el desequilibrio provocado por la asimetría de voltaje en el pcc. S_{U1V} se calcula como el producto de V_{U1} y de I_{e1} , y cuantifica la parte de S_{U1} debido a la asimetría de la tensión de suministro:

$$S_{U1V} = 3V_{U1}I_{e1} \quad (1.88)$$

- La potencia aparente de desequilibrio (S_{U1U}): corresponde al tercer término de la ecuación (1.86). Se calcula como el producto de V_{U1} y de I_{U1} . Cuantifica la parte de S_{U1} debida al desequilibrio de las componentes fundamentales de tensión y de corriente.

$$S_{U1U} = 3V_{U1}I_{U1} \quad (1.89)$$

Utilizando estos nuevos términos, S_{U1} puede reescribirse de la siguiente forma:

$$S_{U1}^2 = S_{U1I}^2 + S_{U1W}^2 - S_{U1U}^2 \quad (1.90)$$

S_{U1U} incluye la potencia activa de secuencia negativa (P_1^-), la potencia activa de secuencia cero P_1^0 , y la potencia de desequilibrio residual (S_{U1e}), tal y como se muestra a continuación:

$$S_{U1U}^2 = (P_1^- + P_1^0)^2 + S_{U1e}^2 \quad (1.91)$$

P_1^- y P_1^0 están definidas en la IEEE Std.1459-2010. S_{U1e} se calcula utilizando las definiciones anteriores según se muestra a continuación:

$$S_{U1e}^2 = S_{U1U}^2 - (P_1^- + P_1^0)^2 \quad (1.92)$$

La descomposición completa S_e , de acuerdo con la IEEE Std.1459-2010 y a la nueva descomposición de S_{U1} propuesta por [23], es mostrada en la figura 1-6.

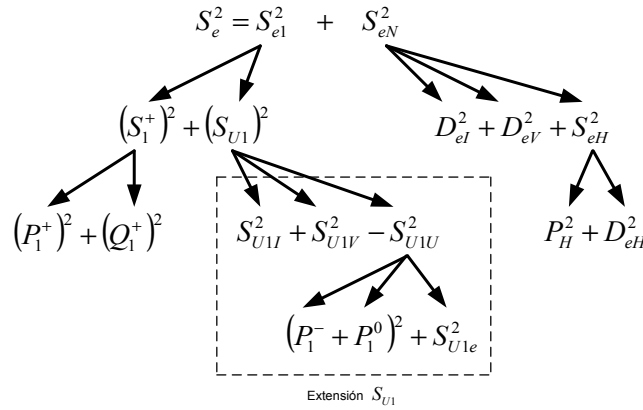


Figura 1-6. Descomposición de S_e , incluyendo la nueva propuesta de descomposición de S_{e1} .

1.2.2. Nueva propuesta de cuantificación para las potencias que conforman la potencia de desequilibrio fundamental.

Las expresiones de S_{U1I} , S_{U1W} , S_{U1U} pueden expresarse en términos de las componentes de secuencia. Para esto, las expresiones para V_{U1} , e I_{U1} , usando las ecuaciones (1.54) y (1.55), pueden escribirse como sigue:

$$V_{U1}^2 = (V_1^-)^2 + \frac{(V_1^0)^2}{2} \quad (1.93)$$

$$I_{U1}^2 = (I_1^-)^2 + 4(I_1^0)^2 \quad (1.94)$$

Las expresiones de S_{U1I} , S_{U1W} , S_{U1U} se pueden escribir utilizando las componentes simétricas de la tensión y la corriente como sigue:

$$S_{UI}^2 = 9 \cdot \left((V_1^+)^2 + (V_1^-)^2 + \frac{(V_1^0)^2}{2} \right) \cdot \left((I_1^-)^2 + 4(I_1^0)^2 \right) \quad (1.95)$$

$$S_{UIV}^2 = 9 \cdot \left((V_1^-)^2 + \frac{(V_1^0)^2}{2} \right) \cdot \left((I_1^+)^2 + (I_1^-)^2 + 4(I_1^0)^2 \right) \quad (1.96)$$

$$S_{UIU}^2 = 9 \cdot \left((V_1^-)^2 + \frac{(V_1^0)^2}{2} \right) \cdot \left((I_1^-)^2 + 4(I_1^0)^2 \right) \quad (1.97)$$

Se observa que:

- S_{UI} cuantifica la parte de S_{U1} debido al desequilibrio de la corriente fundamental demandada por el usuario. Sin embargo, la ecuación (1.95) también incluye a la asimetría de tensión provocada por V_1^- , y V_1^0 .
- S_{UIV} cuantifica la parte de S_{U1} debido a la asimetría de la tensión de suministro. Sin embargo, la ecuación (1.96) también incluye al desequilibrio de la corriente fundamental demandada por el usuario y provocada por I_1^- , y I_1^0 .

Las anteriores observaciones llevan a replantear las definiciones descritas en 1.95 a 1.97. S_{UI} es redefinida si en la ecuación (1.95) no se incluye a V_1^- y V_1^0 , mientras que S_{UIV} es redefinida si en la ecuación (1.96) no se incluye a I_1^- y I_1^0 . La ecuación (1.97) no es redefinida ya que S_{UIU} es el término que incluye simultáneamente al desequilibrio de la corriente fundamental demandada por el usuario. Las ecuaciones (1.95) y (1.96) redefinidas son diferenciadas utilizando el subíndice “*” como sigue:

$$S_{UI*}^2 = 9 \cdot (V_1^+)^2 \cdot \left((I_1^-)^2 + 4(I_1^0)^2 \right) \quad (1.98)$$

$$S_{UIV*}^2 = 9 \cdot \left((V_1^-)^2 + \frac{(V_1^0)^2}{2} \right) \cdot (I_1^+)^2 \quad (1.99)$$

Usando estas nuevas expresiones de potencia, S_{U1} se descompone en los siguientes términos:

$$S_{U1}^2 = (3 \cdot V_1^+ I_{U1})^2 + (3 \cdot V_{U1} I_1^+)^2 + (3 \cdot V_{U1} I_{U1})^2 \quad (1.100)$$

La descomposición completa S_e , de acuerdo con la IEEE Std.1459-2010, de acuerdo a la nueva descomposición de S_{U1} propuesta por [23], y de acuerdo con la corrección propuesta en esta sección es mostrada en la figura 1-7.

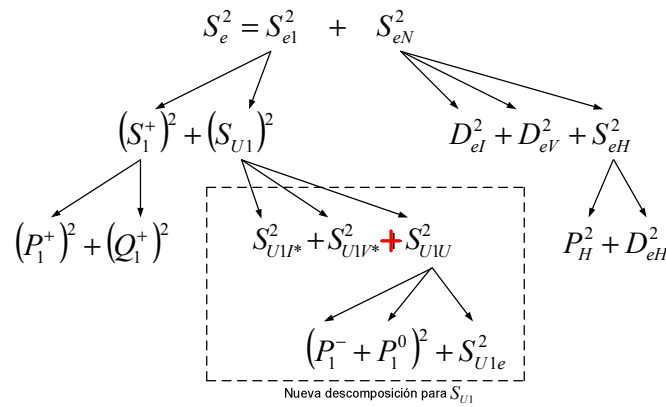


Figura 1-7. Descomposición de S_e , incluyendo la corrección propuesta para S_{U1} .

Con la corrección de los términos que componen a S_{U1} es posible diseñar equipos de medición más precisos discriminando la potencia de desequilibrio causada por corrientes desequilibradas (atribuida al usuario) y la potencia de desequilibrio causada por tensiones asimétricas (atribuida al operador de red). El poder cuantificar la parte de desequilibrio provocada por las corrientes de carga y separarla de la provocada por las tensiones de red, supone que el compensador (al ser un dispositivo diseñado para inyectar corrientes) podrá dimensionarse correctamente aprovechando mejor la potencia disponible para la compensación. En el capítulo 4, esta descomposición será utilizada para explicar los flujos de potencia en los sistemas eléctricos y en los compensadores activos.

1.2.3. Inconsistencias detectadas en la IEEE Std. 1459-2010.

A continuación se desarrollaran algunas situaciones especiales en las cuales la finalidad es descomponer a S_e y observar las potencias que la componen. La IEEE Std. 1459-2010 usualmente calcula algunos términos de la potencia a partir de la resta de potencias. En este capítulo se calculará S_e a partir del producto de voltajes y corrientes efectivos para luego expandirlos en términos de potencia simples. Estos términos de potencia se clasificarán de acuerdo a las características de los voltajes y las corrientes que lo componen. Con este procedimiento se encuentran ciertas inconsistencias debido a que algunos de los términos calculados no coinciden con las términos definidos en la IEEE Std. 1459-2010. Para resaltar estas inconsistencias, se estudian tres casos:

- En la sección 1.2.3.1, se analiza el caso que contempla un sistema de tensiones asimétrico fundamental con carga lineal desequilibrada. Para distinguir las expresiones particulares para este caso se utilizará el subíndice “_c1”.
- En la sección 1.2.3.2, se analiza el caso que contempla un sistema de potencia equilibrado con presencia de armónicos de tercer orden de corriente y voltaje. Para distinguir las expresiones particulares para este caso se utilizará el subíndice “_c2”.

- En la sección 1.2.3.3, se analiza el caso que contempla una carga monofásica no lineal superpuesta con una carga trifásica lineal y equilibrada. Para distinguir las expresiones particulares para este caso se utilizará el subíndice “_c3”.

Para distinguir las expresiones que son erróneas en los tres casos y que no coinciden con las expresiones de la IEEE Std. 1459-2010 se utilizará el subíndice “_m” (el subíndice _m proviene del inglés que significa mistaken).

Con el objetivo de eliminar las inconsistencias y mejorar la cuantificación de la IEEE Std. 1459-2010, en la sección 1.2.3.4 se propondrán unas nuevas expresiones para el cálculo de las potencias de los sistemas eléctricos. A estas nuevas expresiones propuestas se les asignará el subíndice “#”

1.2.3.1. Voltaje asimétrico fundamental y carga desequilibrada lineal.

En este caso, las corrientes rms por fase no son iguales y existe una corriente que circula por el neutro ($I_a \neq I_b \neq I_c$ y $I_N \neq 0$), mientras que los voltajes rms por fase en el pcc no son iguales ($V_a \neq V_b \neq V_c$). Las ecuaciones que explican este caso según la IEEE Std. 1459 están resumidas en la sección 1.2.1. Reemplazando las ecuaciones (1.54) y (1.55) en la ecuación (1.44) se obtiene S_{e1} para sistemas desequilibrados:

$$S_e^2 = S_{e1}^2 = 9 \left((V_1^+)^2 + (V_1^-)^2 + \frac{(V_1^0)^2}{2} \right) \left((I_1^+)^2 + (I_1^-)^2 + 4(I_1^0)^2 \right) \quad (1.101)$$

La expresión anterior está definida en la IEEE Std. 1459-2010, expandiendo sus términos se tiene:

$$S_{e1}^2 = 9 \cdot \left[\begin{aligned} & (V_1^+ \cdot I_1^+)^2 + (V_1^+ \cdot I_1^-)^2 + 4 \cdot (V_1^+ \cdot I_1^0)^2 + \\ & + (V_1^- \cdot I_1^+)^2 + (V_1^- \cdot I_1^-)^2 + 4 \cdot (V_1^- \cdot I_1^0)^2 + \\ & + \frac{1}{2} \cdot (V_1^0 \cdot I_1^+)^2 + \frac{1}{2} \cdot (V_1^0 \cdot I_1^-)^2 + 2 \cdot (V_1^0 \cdot I_1^0)^2 \end{aligned} \right] \quad (1.102)$$

De acuerdo a la ecuación (1.56), S_1^+ es el primer término de la ecuación (1.102), el resto de términos son parte de S_{U1} :

$$S_{U1}^2 = 9 \cdot \left[\begin{aligned} & (V_1^+ \cdot I_1^-)^2 + 4 \cdot (V_1^+ \cdot I_1^0)^2 + \\ & + (V_1^- \cdot I_1^+)^2 + (V_1^- \cdot I_1^-)^2 + 4 \cdot (V_1^- \cdot I_1^0)^2 + \\ & + \frac{1}{2} \cdot (V_1^0 \cdot I_1^+)^2 + \frac{1}{2} \cdot (V_1^0 \cdot I_1^-)^2 + 2 \cdot (V_1^0 \cdot I_1^0)^2 \end{aligned} \right] \quad (1.103)$$

S_1^- en la ecuación (1.103) es el término que está compuesto por el producto entre V_1^- e I_1^- , coincidiendo con el término definido en la IEEE Std. 1459 (ecuación (1.57)). La potencia

aparente de secuencia cero calculada en este apartado corresponde al término que está compuesto por el producto entre V_1^0 e I_1^0 en la ecuación (1.103).

$$(S_{1_{-c1}}^0)^2 = (P_{1_{-m}}^0)^2 + (Q_{1_{-m}}^0)^2 = 9(\sqrt{2}V_1^0 I_1^0)^2 \quad (1.104)$$

Donde $P_{1_{-m}}^0$ es la potencia activa de secuencia cero y $Q_{1_{-m}}^0$ es la potencia reactiva de secuencia cero. $P_{1_{-m}}^0$ está compuesta por los términos de voltaje y corriente que están en fase en la ecuación (1.104):

$$P_{1_{-m}}^0 = 3\sqrt{2}V_1^0 I_1^0 \cos(\theta_1^0) \quad (1.105)$$

De la misma manera $Q_{1_{-m}}^0$ está compuesta por los términos de voltaje y corriente que no están en fase en la ecuación (1.104):

$$Q_{1_{-m}}^0 = 3\sqrt{2}V_1^0 I_1^0 \text{sen}(\theta_1^0) \quad (1.106)$$

Los términos de la ecuación (1.103) que contienen voltajes y corrientes de secuencia de fase diferentes no están definidos en la IEEE Std. 1459-2010. De acuerdo a [23] pueden ser englobados dentro de la potencia de desequilibrio residual (S_{U1e}).

$$S_{U1e}^2 = 9 \cdot \left[\begin{aligned} &(V_1^+ \cdot I_1^-)^2 + 4 \cdot (V_1^+ \cdot I_1^0)^2 + (V_1^- \cdot I_1^+)^2 + \\ &+ 4 \cdot (V_1^- \cdot I_1^0)^2 + \frac{1}{2} \cdot (V_1^0 \cdot I_1^+)^2 + \frac{1}{2} \cdot (V_1^0 \cdot I_1^-)^2 \end{aligned} \right] \quad (1.107)$$

Con la expansión de S_{e1} se han logrado notar varias inconsistencias:

- La expresión de $S_{1_{-c1}}^0$ calculada en la ecuación (1.104) no coincide con S_1^0 definida en la IEEE Std. 1459 (ecuación (1.58)).
- La expresión de $P_{1_{-m}}^0$ calculada en la ecuación (1.105) no coincide con P_1^0 definida en la IEEE Std. 1459 (1.60).
- La expresión de $Q_{1_{-m}}^0$ calculada en la ecuación (1.106) no coincide con Q_1^0 definida en la IEEE Std. 1459 (ecuación (1.62)).

Todas estas expresiones corresponden a las potencias de secuencia cero, las otras potencias de secuencias positiva y negativa no presentan inconsistencias.

1.2.3.2. Sistema de potencia equilibrado con presencia de armónicos de tercer orden de corriente y de voltaje.

En el ejemplo previo se lograron notar inconsistencias de la IEEE Std. 1459-2010, cuando existen componentes desequilibradas de secuencia cero, en este ejemplo se estudiarán los efectos de la presencia de una carga equilibrada no lineal y una fuente de tensión simétrica

distorsionada en presencia de armónicos triples o armónicos cuyo orden es $h=3n+3$ para $n=0,1,2,\dots,\infty$; estos armónicos de acuerdo a [42] tienen una secuencia de rotación igual a cero.

En este caso, las ecuaciones de la IEEE Std. 1459-2010 que explican el comportamiento de la potencia eléctrica están resumidas en la sección 1.2.3, teniendo en cuenta la consideración de que el sistema es equilibrado ($S_1=S_1^+$, $P_1=P_1^+$, y $Q_1=Q_1^+$). Los voltajes instantáneos son $v_a=v_{1a}+v_{ha}$, $v_b=v_{1b}+v_{hb}$, $v_c=v_{1c}+v_{hc}$; con $V_{1a}=V_{1b}=V_{1c}$ y $V_{ha}=V_{hb}=V_{hc}$; de la misma manera, las corrientes instantáneas son $i_a=i_{1a}+i_{ha}$, $i_b=i_{1b}+i_{hb}$, $i_c=i_{1c}+i_{hc}$; con $I_{1a}=I_{1b}=I_{1c}$ y $I_{ha}=I_{hb}=I_{hc}$.

V_e está compuesto por tensiones de secuencia directa fundamental (V_1^+) y por tensiones armónicas triples (V_h^0), teniendo en cuenta estas consideraciones V_e puede ser calculado a partir de la ecuación (1.39) como sigue:

$$V_e = \sqrt{(V_1^+)^2 + \frac{1}{2}(V_h^0)^2} \quad (1.108)$$

De la misma manera, I_e está compuesto por I_1^+ e I_h^0 y puede ser calculado a partir de la ecuación (1.43) como sigue:

$$I_e = \sqrt{(I_1^+)^2 + 4(I_h^0)^2} \quad (1.109)$$

Reemplazando las ecuaciones (1.108) y (1.109) en la ecuación (1.44), S_e es:

$$S_e^2 = 9 \left((V_1^+)^2 + \frac{1}{2}(V_h^0)^2 \right) \left((I_1^+)^2 + 4(I_h^0)^2 \right) \quad (1.110)$$

Expandiendo la anterior expresión se tiene:

$$S_e^2 = 9 \left[(V_1^+ I_1^+)^2 + 4(V_1^+ I_h^0)^2 + \frac{1}{2}(V_h^0 I_1^+)^2 + 2(V_h^0 I_h^0)^2 \right] \quad (1.111)$$

El primer término de la ecuación (1.111) es S_1^+ el resto de términos de acuerdo a la ecuación (1.71) forman parte de S_{eN} :

$$S_{eN}^2 = 9 \left[4(V_1^+ I_h^0)^2 + \frac{1}{2}(V_h^0 I_1^+)^2 + 2(V_h^0 I_h^0)^2 \right] \quad (1.112)$$

El primer término de la ecuación (1.112) que está formado por V_1^+ e I_h^0 es la potencia debido a la distorsión de corriente (D_{el}):

$$D_{el}^2 = 9(2V_1^+ I_h^0)^2 \quad (1.113)$$

El segundo término de la ecuación (1.112) que está formado por V_h^0 e I_1^+ es la potencia debido a la distorsión de voltaje (D_{eV}):

$$D_{eV}^2 = 9 \left(\frac{V_h^0 I_1^+}{\sqrt{2}} \right)^2 \quad (1.114)$$

El tercer término de la ecuación (1.112) que está formado por V_h^0 e I_h^0 es la potencia armónica aparente ($S_{eH\#}$):

$$(S_{eH_c2})^2 = (P_{H_m})^2 + (D_{eH_m})^2 = 9(\sqrt{2}V_h^0 I_h^0)^2 \quad (1.115)$$

Donde P_{H_m} es la potencia activa armónica y corresponde a la potencia de la ecuación (1.115) que es debida a la componente de la corriente en fase con la tensión.

$$P_{eH_m} = 3\sqrt{2}V_h^0 I_h^0 \cos(\theta_h^0) \quad (1.116)$$

$D_{eH\#}$ es la potencia armónica de distorsión y en este caso, de acuerdo a la naturaleza del voltaje y la corriente, coincide con la potencia reactiva armónica (Q_{eH_m}):

$$D_{eH_m} = Q_{H_m} = 3\sqrt{2}V_h^0 I_h^0 \sen(\theta_h^0) \quad (1.117)$$

El análisis de los dos primeros casos muestra un sobredimensionamiento de orden $\sqrt{2}$ en los términos de potencia que contienen componentes de corriente y de tensión de secuencia cero. La sobrevaloración de estos términos de potencia (ecuaciones (1.60), (1.62), (1.75), y (1.76)) pone de manifiesto que, cualquier término de potencia que contenga componentes de voltaje y corriente de secuencia cero independientemente si es provocado por desequilibrios o armónicos triples, no coincide con los términos comúnmente aceptados definidos en la IEEE Std. 1459-2010.

1.2.3.3. Carga monofásica no lineal superpuesta con un sistema trifásico de potencia lineal y equilibrado.

En este ejemplo, será asumido que en el sistema trifásico de la figura 1-7, en el que existe una carga trifásica equilibrada lineal superpuesta con una carga monofásica no lineal en la fase a ($i_a=i_{a1}+i_{ah}$, $i_b=i_{b1}$, $i_c=i_{c1}$, y $I_{a1}=I_{b1}=I_{c1}$). La fuente de tensión que alimenta la carga está compuesta por una fuente trifásica simétrica fundamental superpuesta con una fuente monofásica no fundamental en la fase a ($v_a=v_{a1}+v_{an}$, $v_b=v_{b1}$, $v_c=v_{c1}$, y $V_{a1}=V_{b1}=V_{c1}$). Debido al desequilibrio de la componente armónica, ésta se puede modelar en el sistema trifásico como desequilibrada, así que éste armónico estará compuesto por componentes de secuencia positiva, negativa y cero; por lo que, V_e está compuesto por tensiones simétricas fundamentales (V_1^+) y por tensiones asimétricas no fundamentales (V_h^+ , V_h^- , y V_h^0). La figura 1.7 incluye las expresiones temporales supuestas en este caso.

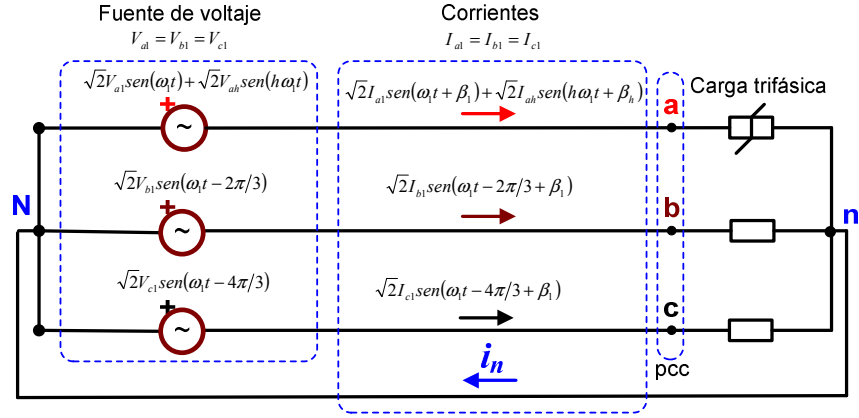


Figura 1-7. Sistema eléctrico trifásico a 4 hilos superpuesto a un sistema monofásico no lineal.

Teniendo en cuenta estas consideraciones V_e puede ser calculado a partir de la ecuación (1.39) como sigue:

$$V_e = \sqrt{(V_1^+)^2 + (V_h^+)^2 + (V_h^-)^2 + \frac{1}{2}(V_h^0)^2} \quad (1.118)$$

De la misma manera, I_e está compuesto por I_1^+ , I_h^+ , I_h^- , e I_h^0 y puede ser calculado a partir de la ecuación (1.43) como sigue:

$$I_e = \sqrt{(I_1^+)^2 + (I_h^+)^2 + (I_h^-)^2 + 4(I_h^0)^2} \quad (1.119)$$

Reemplazando las ecuaciones (1.118) y (1.119) en la ecuación (1.44), S_e puede expresarse como sigue:

$$S_e^2 = 9 \left((V_1^+)^2 + (V_h^+)^2 + (V_h^-)^2 + \frac{1}{2}(V_h^0)^2 \right) \left((I_1^+)^2 + (I_h^+)^2 + (I_h^-)^2 + 4(I_h^0)^2 \right) \quad (1.120)$$

Expandiendo la anterior expresión se tiene:

$$S_e^2 = 9 \left[\begin{aligned} &(V_1^+ I_1^+)^2 + (V_1^+ I_h^+)^2 + (V_1^+ I_h^-)^2 + 4(V_1^+ I_h^0)^2 \\ &(V_h^+ I_1^+)^2 + (V_h^+ I_h^+)^2 + (V_h^+ I_h^-)^2 + 4(V_h^+ I_h^0)^2 \\ &(V_h^- I_1^+)^2 + (V_h^- I_h^+)^2 + (V_h^- I_h^-)^2 + 4(V_h^- I_h^0)^2 \\ &\frac{1}{2}(V_h^0 I_1^+)^2 + \frac{1}{2}(V_h^0 I_h^+)^2 + \frac{1}{2}(V_h^0 I_h^-)^2 + 2(V_h^0 I_h^0)^2 \end{aligned} \right] \quad (1.121)$$

El primer término de la ecuación (1.121) es S_{11}^+ el resto de términos de acuerdo a la ecuación (1.71) forman parte de S_{eN} :

$$S_{eN}^2 = 9 \begin{bmatrix} (V_1^+ I_h^+)^2 + (V_1^+ I_h^-)^2 + 4(V_1^+ I_h^0)^2 \\ (V_h^+ I_1^+)^2 + (V_h^+ I_h^+)^2 + (V_h^+ I_h^-)^2 + 4(V_h^+ I_h^0)^2 \\ (V_h^- I_1^+)^2 + (V_h^- I_h^+)^2 + (V_h^- I_h^-)^2 + 4(V_h^- I_h^0)^2 \\ \frac{1}{2}(V_h^0 I_1^+)^2 + \frac{1}{2}(V_h^0 I_h^+)^2 + \frac{1}{2}(V_h^0 I_h^-)^2 + 2(V_h^0 I_h^0)^2 \end{bmatrix} \quad (1.122)$$

De acuerdo a las características de los voltajes y las corrientes, los términos de la ecuación (1.122) que contienen a V_1^+ son la potencia debido a la distorsión de corriente (D_{ei}):

$$D_{ei}^2 = 9 \left[(V_1^+ I_h^+)^2 + (V_1^+ I_h^-)^2 + 4(V_1^+ I_h^0)^2 \right] \quad (1.123)$$

De acuerdo a las características de los voltajes y corrientes, los términos de la ecuación (1.122) que contienen a I_1^+ corresponden a la potencia debido a la distorsión de voltaje (D_{eV}):

$$D_{eV}^2 = 9 \left[(V_h^+ I_1^+)^2 + (V_h^- I_1^+)^2 + \frac{1}{2}(V_h^0 I_1^+)^2 \right] \quad (1.124)$$

Los términos de la ecuación (1.122) que no contienen componentes fundamentales de corriente o voltaje forman a la potencia armónica aparente ($S_{eH_{c3}}$):

$$(S_{eH_{c3}})^2 = (P_{H_{m}})^2 + (D_{eH_{m}})^2 = 9 \begin{bmatrix} (V_h^+ I_h^+)^2 + (V_h^+ I_h^-)^2 + 4(V_h^+ I_h^0)^2 + \\ + (V_h^- I_h^+)^2 + (V_h^- I_h^-)^2 + 4(V_h^- I_h^0)^2 + \\ + \frac{1}{2}(V_h^0 I_h^+)^2 + \frac{1}{2}(V_h^0 I_h^-)^2 + 2(V_h^0 I_h^0)^2 \end{bmatrix} \quad (1.125)$$

Donde $P_{H_{m}}$ es la potencia activa armónica y puede calcularse a partir de los términos de la ecuación (1.122) que tienen la misma secuencia de rotación y están en fase:

$$P_{H_{m}} = 3 \left[V_h^+ I_h^+ \cos \theta_h^+ + V_h^- I_h^- \cos \theta_h^- + \sqrt{2} V_h^0 I_h^0 \cos \theta_h^0 \right] \quad (1.126)$$

La potencia armónica reactiva ($Q_{H_{m}}$) es la potencia que puede calcularse a partir de la ecuación (1.122) obteniendo los términos que tienen la misma secuencia de rotación pero que están en cuadratura:

$$Q_{H_{m}} = 3 \left[V_h^+ I_h^+ \text{sen} \theta_h^+ + V_h^- I_h^- \text{sen} \theta_h^- + \sqrt{2} V_h^0 I_h^0 \text{sen} \theta_h^0 \right] \quad (1.127)$$

$D_{eH_{m}}$ que es la potencia armónica de distorsión. De acuerdo a la ecuación (1.122), $Q_{H_{m}}$ está contenida dentro de $D_{eH_{m}}$. También $D_{eH_{m}}$ contiene los términos que voltaje y corriente que no tienen la misma secuencia de rotación:

$$D_{eH_m}^2 = 9 \left[\begin{aligned} & (V_h^+ I_h^+ \text{sen} \theta_h^+)^2 + (V_h^+ I_h^-)^2 + 4(V_h^+ I_h^0)^2 + \\ & + (V_h^- I_h^+)^2 + (V_h^- I_h^- \text{sen} \theta_h^-)^2 + 4(V_h^- I_h^0)^2 + \\ & + \frac{1}{2} (V_h^0 I_h^+)^2 + \frac{1}{2} (V_h^0 I_h^-)^2 + 2(V_h^0 I_h^0 \text{sen} \theta_h^0)^2 \end{aligned} \right] \quad (1.128)$$

Se confirma que la inconsistencia en los términos definidos en la IEEE Std. 1459-2010 aparece cuando existen componentes de secuencia cero. En este ejemplo se analizó un armónico desequilibrado (con componentes de secuencia positiva, negativa y cero). A pesar de existir todas las componentes de secuencia, sólo se observan inconsistencias con las componentes de secuencia cero.

1.2.3.4. Nueva propuesta para el cálculo de los términos de potencia de la IEEE Std. 1459-2010.

Para evitar el sobredimensionamiento en los términos de potencia definidos en la IEEE Std. 1459-2010, en esta tesis se proponen nuevos términos de voltaje efectivo y de corriente efectiva que designaremos como $V_{e\#}$ y $I_{e\#}$, respectivamente. $V_{e\#}$ sólo contiene las tensiones simples sin tener en cuenta a las tensiones compuestas. $I_{e\#}$ contiene a las corrientes de las fases sin tener en cuenta la corriente del neutro.

$$V_{e\#} = \sqrt{\frac{1}{3}(V_a^2 + V_b^2 + V_c^2)} \quad (1.129)$$

$$I_{e\#} = \sqrt{\frac{1}{3}(I_a^2 + I_b^2 + I_c^2)} \quad (1.130)$$

Usando las ecuaciones (1.129) y (1.130) en la ecuación (1.44), una nueva expresión de potencia aparente efectiva ($S_{e\#}$) es definida:

$$S_{e\#} = 9V_{e\#}^2 I_{e\#}^2 = (V_a^2 + V_b^2 + V_c^2)(I_a^2 + I_b^2 + I_c^2) \quad (1.131)$$

Las nuevas expresiones para el voltaje efectivo fundamental ($V_{e1\#}$) y la corriente efectiva fundamental ($I_{e1\#}$) son:

$$V_{e1\#} = \sqrt{\frac{V_{a1}^2 + V_{b1}^2 + V_{c1}^2}{3}} = \sqrt{(V_1^+)^2 + (V_1^-)^2 + (V_1^0)^2} \quad (1.132)$$

$$I_{e1\#} = \sqrt{\frac{I_{a1}^2 + I_{b1}^2 + I_{c1}^2}{3}} = \sqrt{(I_1^+)^2 + (I_1^-)^2 + (I_1^0)^2} \quad (1.133)$$

La nueva potencia aparente efectiva fundamental ($S_{e1\#}$) puede escribirse como sigue:

$$S_{e1\#} = 9V_{e1\#}^2 I_{e1\#}^2 = (V_{a1}^2 + V_{b1}^2 + V_{c1}^2)(I_{a1}^2 + I_{b1}^2 + I_{c1}^2) \quad (1.134)$$

$S_{e1\#}$ también puede reescribirse en términos de las componentes simétricas fundamentales:

$$S_{e1\#} = \left((V_1^+)^2 + (V_1^-)^2 + (V_1^0)^2 \right) \left((I_1^+)^2 + (I_1^-)^2 + (I_1^0)^2 \right) \quad (1.135)$$

Las nuevas expresiones para el voltaje efectivo no fundamental ($V_{eH\#}$) y la corriente efectiva no fundamental ($I_{eH\#}$) son:

$$V_{eH\#} = \sqrt{\frac{V_{aH}^2 + V_{bH}^2 + V_{cH}^2}{3}} = \sqrt{V_{e\#}^2 - V_{e1\#}^2} \quad (1.136)$$

$$I_{eH\#} = \sqrt{\frac{I_{aH}^2 + I_{bH}^2 + I_{cH}^2}{3}} = \sqrt{I_{e\#}^2 - I_{e1\#}^2} \quad (1.137)$$

Con las expresiones propuestas de $V_{e\#}$, $I_{e\#}$, y $S_{e\#}$, la potencia aparente efectiva no fundamental ($S_{eN\#}$) es escrita como sigue:

$$S_{eN\#}^2 = S_{e\#}^2 - S_{e1\#}^2 = 9 \left[(V_{e1\#} I_{eH\#})^2 + (V_{eH\#} I_{e1\#})^2 + (V_{eH\#} I_{eH\#})^2 \right] \quad (1.138)$$

Los nuevos términos de potencia que componen a $S_{eN\#}$ son escritos como sigue:

$$D_{e1\#}^2 = 9 (V_{e1\#} I_{eH\#})^2 \quad (1.139)$$

$$D_{eV\#}^2 = 9 (V_{eH\#} I_{e1\#})^2 \quad (1.140)$$

$$S_{eH\#}^2 = 9 (V_{eH\#} I_{eH\#})^2 \quad (1.141)$$

las nuevas expresiones para $V_{U1\#}$, e $I_{U1\#}$ son escritas como sigue:

$$V_{U1\#}^2 = (V_1^-)^2 + (V_1^0)^2 \quad (1.142)$$

$$I_{U1\#}^2 = (I_1^-)^2 + (I_1^0)^2 \quad (1.143)$$

La nueva definición para la potencia de desequilibrio fundamental ($S_{U1\#}$) es:

$$S_{U1\#}^2 = S_{e1\#}^2 - (S_1^+)^2 = (3 \cdot V_1^+ I_{U1\#})^2 + (3 \cdot V_{U1\#} I_1^+)^2 + (3 \cdot V_{U1\#} I_{U1\#})^2 \quad (1.144)$$

Las nuevas potencias $S_{U1\#}$, $S_{U1V\#}$, y $S_{U1U1\#}$ que componen a $S_{U1\#}$ se escriben como sigue:

$$S_{U1\#}^2 = 9 \cdot (V_1^+)^2 \cdot \left((I_1^-)^2 + (I_1^0)^2 \right) \quad (1.145)$$

$$S_{U1V\#}^2 = 9 \cdot \left((V_1^-)^2 + (V_1^0)^2 \right) \cdot (I_1^+)^2 \quad (1.146)$$

$$S_{U1U1\#}^2 = 9 \cdot \left((V_1^-)^2 + (V_1^0)^2 \right) \cdot \left((I_1^-)^2 + (I_1^0)^2 \right) \quad (1.147)$$

Los nuevos THD 's ($THD_{e1\#}$, y $(THD_{eV\#})$,) se escriben a continuación:

$$THD_{e1\#} = \frac{I_{eH\#}}{I_{e\#}} \quad (1.148)$$

$$THD_{eV\#} = \frac{V_{eH\#}}{V_{e\#}} \quad (1.149)$$

Mediante estas expresiones se obtienen los términos de potencia comúnmente aceptados y definidos en la IEEE Std 1459-2010.

1.2.3.5. Estudio comparativo de magnitudes de la IEEE Std. 1459-2010.

A continuación se desarrollará el cálculo teórico de las magnitudes de potencias, voltaje, y corriente usando la IEEE Std. 1459-2010 y usando las definiciones y descomposiciones propuestas en la tesis (sección 1.2.3.4). Se utilizará el mismo caso desarrollado en el Anexo A.3 de la IEEE Std. 1459-2000 [20]. El caso corresponde a un sistema trifásico a 4 hilos desequilibrado y no lineal que demanda todas las ineficiencias de potencia (circuito de la figura A.3 en la IEEE Std. 1459-2000). En la tabla 1-1, que corresponde con la tabla A.5 de la IEEE Std. 1459-2000, se encuentran resumidos los valores de los fasores de voltaje y corriente.

<i>h</i>	1	3	5	7	9
V_{ah} (%)	100	10.28	4.92	7.44	8.64
α_{ah} (deg)	-0.74	6.76	142.30	146.70	-47.40
I_{ah} (%)	100	68.84	34.90	27.85	5.93
β_{ah} (deg)	-22.00	100	-175.00	-65.00	48.00
V_{bh} (%)	104.49	10.53	5.79	8.58	11.05
α_{bh} (deg)	-121.20	6.28	167.40	125.20	-49.19
I_{bh} (%)	93.49	79.77	42.30	45.81	40.59
β_{bh} (deg)	-120.80	99.49	65.09	-167.90	41.89
V_{ch} (%)	103.73	8.69	4.30	6.58	8.22
α_{ch} (deg)	121.30	9.70	157.70	136.50	-47.35
I_{ch} (%)	0	0	0	0	0
I_{nh} (%)	178.12	21.01	63.28	67.87	65.75
V_{abh} (%)	177.56	0.26	2.48	3.19	2.43
V_{bch} (%)	177.93	1.93	1.65	2.49	2.84
V_{cah} (%)	178.28	1.67	1.36	1.51	0.41

Tabla 1-1. Fasores de las componentes armónicas de voltaje y corriente en porcentaje (%). Valores base $V_{a1}=271.03$ V, $I_{a1}=99.98$ A.

Las magnitudes calculadas se resumen en la tabla 1-2. Las magnitudes que son diferentes para ambas propuestas se presentan en dos columnas. La columna de la izquierda presenta las magnitudes calculadas usando las definiciones de la IEEE Std. 1459-2010, mientras que la columna de la derecha presenta las magnitudes calculadas usando la propuesta de la tesis (#). Las magnitudes que son iguales para ambas propuestas se encuentran centradas en una celda común a ambas columnas. En el anexo A.3 de la IEEE Std. 1459-2000, los valores de V_1^+ y V_1^0 están mal calculados. En dicho anexo V_1^+ tiene el valor de 288.49 V, y V_1^0 tiene el valor de 2.98 V. Usando las expresiones de la IEEE Std. 1459-2010, estos dos valores son corregidos en

la tabla 1-2. El valor correcto de V_1^+ es 278.41 V, mientras que el valor correcto para V_1^0 es 7.48 V.

	IEEE 1459	Propuesta tesis (#)
V_e (V)	280.25	282.02
V_{e1} (V)	278.46	278.50
V_{eH} (V)	31.72	44.39
I_e (A)	165.13	111.64
I_{e1} (A)	107.40	79.02
I_{eH} (A)	125.43	78.86
I_1^+ (A)	63.38	
I_1^- (A)	21.52	
I_1^0 (A)	42.00	
V_1^+ (V)	278.41	
V_1^- (V)	0.66	
V_1^0 (V)	7.48	
S_e (VA)	138839.10	94456.83
S_{e1} (VA)	89721.70	66023.58
S_1^+ (VA)	52939.75	
P_1^+ (W)	51867.53	
Q_1^+ (var)	10600.75	
S_{U1} (VA)	72438.70	39452.45
S_{eN} (VA)	105954.30	67549.83
S_{eH} (VA)	11934.99	10503.33
D_{e1} (VA)	104782.78	65893.12
D_{eF} (VA)	10219.50	10524.13
P (W)	51329.87	
P_{a1} (W)	25253.44	
P_{b1} (W)	26470.36	
P_{e1} (W)	-0.13	
P_1^- (W)	-35.24	
P_1^0 (W)	-108.63	
P_H (W)	-393.80	
THD_{e1} (%)	116.79	99.80
THD_{eV} (%)	11.39	15.94
P_F	0.370	0.543
P_{F1}^+	0.980	
P_{FT}	0.374	0.549

Tabla 1-2. Magnitudes de la IEEE Std. 1459-2010 y de la propuesta de la tesis (#).

Debido a que la tensión de suministro contiene a V_1^0 y a V_H^0 , los voltajes efectivos (V_e , V_{e1} , y V_{eH}) son levemente mayores para la propuesta de la tesis (#) que para la IEEE Std. 1459-2010. Por lo que, con la IEEE Std. 1459-2010, los voltajes efectivos se encuentran levemente subvalorados. Las corrientes efectivas (I_e , I_{e1} , y I_{eH}) son mayores para la IEEE Std. 1459-2010 que para la propuesta de la tesis. Las corrientes efectivas están sobrevaloradas para la IEEE Std. 1459-2010 debido a que la corriente de la carga contiene a I_1^0 y a I_H^0 . Las corrientes efectivas sobrevaloradas de la IEEE 1459-2010 conllevan a que S_e , S_{e1} , S_{U1} , S_{eN} , D_{e1} , y THD_{e1} también se encuentren sobrevaloradas. La sobrevaloración de S_e reduce los factores de potencia P_F , y P_{FT} . La subvaloración de los voltajes sólo conlleva a que S_{U1V} este subvalorado. En la tabla 1-3 se pueden ver los factores de variación entre las dos propuestas.

$V_e = 0.99 V_{e\#}$	$V_{e1} = 0.99 V_{e1\#}$	$V_{eH} = 0.71 V_{eH\#}$
$I_e = 1.48 I_{e\#}$	$I_{e1} = 1.36 I_{e1\#}$	$I_{eH} = 1.59 I_{eH\#}$
$S_e = 1.47 S_{e\#}$	$S_{e1} = 1.36 S_{e1\#}$	$S_{U1} = 1.83 S_{U1\#}$
$S_{eN} = 1.56 S_{eN\#}$		
$D_e = 1.59 D_{e\#}$	$D_{eV} = 0.97 D_{eV\#}$	$S_{eH} = 1.13 S_{eH\#}$
$P_F = 0.68 P_{F\#}$		$P_{FT} = 0.68 P_{FT\#}$

Tabla 1-3. Factores de variación entre las dos propuestas.

En la tabla 1-4 se resumen las magnitudes de potencia que cuantifican el desequilibrio a frecuencia fundamental (S_{U1} , S_{U1V} , S_{U1U} , y S_{U1e}), esta tabla se organiza como sigue:

- En la primera columna se muestran los valores de S_{U1} , S_{U1V} , S_{U1U} , y S_{U1e} usando las definiciones de la IEEE Std. 1459-2010, indicando con la frase “No definido” que no existe en dicha norma ninguna magnitud de potencia que permita identificar la demanda de potencia desequilibrada provocada individualmente por corrientes desequilibradas y tensiones asimétricas.
- En la segunda columna se muestran los valores de S_{U1} , S_{U1V} , S_{U1U} , y S_{U1e} usando el procedimiento propuesto por [23], donde son definidas por primera vez (ecuaciones 1.87, 1.88, 1.89, y 1.92 respectivamente).
- En la tercera columna se muestran los valores de S_{U1*} , S_{U1V*} , S_{U1U} , y S_{U1e} usando el procedimiento de la sección 1.2.2. (ecuaciones 1.98, 1.99, 1.89, y 1.92 respectivamente). Con este procedimiento S_{U1*} , y S_{U1V*} fueron modificadas y por eso se incluye el subíndice “*”, mientras que las magnitudes de S_{U1U} , y S_{U1e} permanecieron inalteradas.
- En la cuarta columna se muestran los valores de $S_{U1\#}$, $S_{U1V\#}$, $S_{U1U\#}$, y $S_{U1e\#}$ usando el procedimiento propuesto en la sección 1.2.3.4 (ecuaciones 1.145, 1.146, 1.147, y 1.148). Con este procedimiento todas las magnitudes de potencia fueron modificadas y por eso tienen el subíndice “#”. El subíndice “#” indica que son las magnitudes que incluyen todas las correcciones y que han sido propuestas en la presente tesis.

IEEE Std. 1459	Procedimiento propuesto en [23]	Procedimiento sección 1.2.2. “*”	Procedimiento propuesto en 1.2.3.4 “#”
S_{U1} (No definido)	$S_{U1} = 72438.41$ VA	$S_{U1*} = 72425.13$ VA	$S_{U1\#} = 39416.4$ VA
S_{U1V} (No definido)	$S_{U1V} = 1717.49$ VA	$S_{U1V*} = 1013.48$ VA	$S_{U1V\#} = 1427.77$ VA
S_{U1U} (No definido)	$S_{U1U} = 1386.58$ VA	$S_{U1U} = 1386.58$ VA	$S_{U1U\#} = 1063.11$ VA
S_{U1e} (No definido)	$S_{U1e} = 1379.10$ VA	$S_{U1e} = 1379.10$ VA	$S_{U1e\#} = 1296.52$ VA

Tabla 1-4. Potencias que cuantifican el desequilibrio, cálculo con diferentes propuestas.

Con el procedimiento de cálculo propuesto en la sección 1.2.3.4, las magnitudes de potencia que cuantifican el desequilibrio son valoradas mejor. Cada magnitud de potencia considera sólo el efecto que la provoca. $S_{U1\#}$ sólo considera el efecto de las corrientes desequilibradas, $S_{U1V\#}$ sólo considera el efecto de las tensiones asimétricas, y $S_{U1U\#}$ considera el efecto combinado de las corrientes desequilibradas y de las tensiones asimétricas. Para calcular estas potencias, se utilizan las nuevas expresiones de corriente efectiva ($I_{e\#}$) y de voltaje efectivo

($V_{e\#}$), también se utilizan las nuevas expresiones para la corriente de desequilibrio fundamental ($I_{U1\#}$) y el voltaje de desequilibrio fundamental ($V_{U1\#}$). Usando $V_{e\#}$, $I_{e\#}$, $V_{U1\#}$, e $I_{U1\#}$, la potencia de desequilibrio de corriente (S_{U1I}) no es sobrevalorada, la potencia de desequilibrio de voltaje (S_{U1V}) no es subvalorada, y las potencias S_{U1I} y S_{U1e} no son sobrevaloradas.

Si se utiliza el procedimiento de cálculo propuesto no se presentan inconsistencias con respecto a las expresiones comúnmente aceptadas, cada término de potencia puede obtenerse usando resta de potencias cuadráticas como en la IEEE Std. 1459-2010 o expandiendo S_e en términos simples. Es por todo ello que en los siguientes capítulos éste procedimiento de cálculo será utilizado como base para el desarrollo de la tesis.

1.3. Conclusiones

En la IEEE Std. 1459-2010 aparecen las definiciones para las medidas de las magnitudes de potencia de los sistemas eléctricos en condiciones senoidales o no senoidales y equilibradas o desequilibradas. Se establece P_1^+ como la única potencia eficiente que demanda la carga, los otros términos de potencia son considerados ineficientes (S_{eN} , S_{U1} , y Q_1^+). S_{eN} cuantifica los efectos provocados por corrientes y tensiones armónicas, S_{U1} cuantifica los efectos de los voltajes asimétricos y corrientes desequilibradas fundamentales, y Q_1^+ cuantifica la potencia demandada cuando existen cargas lineales reactivas. Además, los autores de la IEEE Std. 1459-2010 reiteran que Q_1^+ es la potencia con la cual se debe tener cuidado extremo, ya que influye notoriamente en la amplitud de tensión de suministro, afecta a la estabilidad de sistemas electromecánicos y provoca pérdidas de energía. Las potencias P_1^- , P_1^0 , y P_H , a pesar de ser potencias activas, son consideradas ineficientes ya que provocan pérdidas de potencia en los conductores de alimentación, transformadores y demás elementos del sistema eléctrico de potencia. Las potencias Q_1^- , y Q_1^0 son provocadas por cargas reactivas desequilibradas, mientras que Q_H es provocada por el desfase entre tensiones y corrientes armónicas. D_{eI} sirve para cuantificar los fenómenos de potencia provocados por corrientes armónicas, mientras que D_{eV} sirve para cuantificar los fenómenos de potencia provocados por las tensiones armónicas.

En la IEEE Std. 1459-2010 no existen términos de potencia que sirvan para cuantificar individualmente los fenómenos provocados por corrientes desequilibradas y voltajes asimétricos. Con la nueva descomposición de S_{U1} propuesta en [23], S_{U1I} sirve para cuantificar los fenómenos de potencia provocados por corrientes desequilibradas, mientras que S_{U1V} sirve para cuantificar los fenómenos de potencia provocados por voltajes asimétricos. En este capítulo se propone la redefinición de S_{U1I} y S_{U1V} . Para esto se propone que S_{U1I} sea calculada sin tener en cuenta a V_1^- y V_1^0 , así como que S_{U1V} sea calculada sin tener en cuenta a I_1^- y I_1^0 .

En el caso de que la red de suministro y/o la corriente de carga contengan componentes de secuencia cero, algunas potencias definidas en la IEEE Std. 1459-2010 presentan inconsistencias. Los resultados no son los mismos cuando se calculan los términos de potencia a partir de la resta de potencias, tal y como se realiza en la IEEE Std. 1459-2010, que cuando se realiza a partir de la expansión de S_e . Para corregir estas inconsistencias nuevas expresiones de voltaje efectivo ($V_{e\#}$), corriente efectiva ($I_{e\#}$), y potencia aparente efectiva ($S_{e\#}$) son definidas. $V_{e\#}$ es definida a partir de V_e sin tener en cuenta las tensiones compuestas, $I_{e\#}$ es definida a partir de I_e sin tener en cuenta la corriente del neutro, y $S_{e\#}$ es calculada a partir del producto de $V_{e\#}$ e $I_{e\#}$. Los términos de potencia que cambian con las nuevas expresiones de $V_{e\#}$ e $I_{e\#}$ fueron redefinidos. Las nuevas expresiones para cuantificar el

desequilibrio también fueron redefinidas obteniéndose nuevas expresiones para $S_{UI\#}$, $S_{UIV\#}$, y $S_{UIU\#}$ más precisas.

2. Extensión de la teoría de potencia eléctrica desarrollada en la IEEE Std. 1459-2010 mediante el estudio de los flujos de potencia instantánea en los sistemas eléctricos.

Desde hace más de un siglo, numerosos científicos se han preocupado de intentar explicar los fenómenos existentes en los sistemas eléctricos. Sus trabajos han dado lugar a la aparición, a lo largo del tiempo, de las diferentes teorías de la potencia eléctrica existentes. Una teoría de la potencia eléctrica debe entenderse como un conocimiento desde el nivel más básico de las propiedades de los sistemas eléctricos [2]-[3] y, a su vez, debe establecer las herramientas matemáticas (ecuaciones y modelos) que proporcionen una interpretación física del conjunto de fenómenos propios de los sistemas eléctricos, permitiendo su cuantificación, el desarrollo de equipos de medida y el desarrollo de equipos de compensación.

Las teorías de la potencia instantánea surgen a partir de desarrollos matemáticos complejos, con mayor o menor grado de abstracción, en los que no se puede establecer una relación directa entre las magnitudes calculadas y los fenómenos físicos reales presentes en el sistema eléctrico. Estas teorías resultan ideales para el diseño de compensadores globales, donde lo fundamental es obtener el valor de la corriente activa del sistema, y además de forma instantánea, para que el compensador genere todas las corrientes no activas de la carga. Sin embargo, al no existir una relación directa entre las magnitudes utilizadas y los fenómenos físicos reconocidos en los sistemas eléctricos (desfase, desequilibrio y distorsión), no será posible la implementación de un compensador selectivo que pueda seleccionar el fenómeno físico ineficiente a mitigar.

La teoría de la potencia instantánea, utilizada en esta tesis, consiste en obtener expresiones de potencia a partir del producto de voltajes y corrientes instantáneos, esto con el fin de obtener expresiones en función del tiempo que permitan explicar el comportamiento de los sistemas eléctricos de potencia y entender la naturaleza de los flujos de energía. Según se indica en la IEEE Std. 1459-2010, no existe una teoría de potencia eléctrica que sirva simultáneamente para facturar energía, evaluar la calidad de la energía, detectar las fuentes de distorsión armónica y diseñar equipos de mitigación tales como filtros activos o compensadores dinámicos [21]. En la tesis, se propone la teoría de la potencia instantánea para explicar los fenómenos físicos que surgen en los sistemas eléctricos y contribuir con una teoría que simultáneamente pueda:

- Cuantificar correctamente el intercambio de potencia eléctrica entre la empresa de distribución de energía eléctrica y los usuarios o clientes. Si se cuantifica correctamente el intercambio de potencia, es posible diseñar medidores de energía que midan correctamente la demanda de potencia de los consumidores.

- Evaluar correctamente la calidad de la potencia de los sistemas eléctricos. Si se explican los fenómenos físicos que aparecen en los sistemas eléctricos, es posible determinar con certeza los niveles de desequilibrio, distorsión, y de demanda de potencia reactiva.
- Detectar las fuentes de distorsión armónica en los sistemas eléctricos. Si se entienden los flujos de potencia o el intercambio de potencia entre la red de suministro y la carga, es posible determinar las fuentes de distorsión. Determinar si la distorsión proviene de la red de suministro o de la carga. Se podría establecer un criterio para penalizar los clientes que introduzcan fuentes de distorsión, y los clientes podrían reclamar indemnizaciones a las empresas distribuidoras por el deterioro de la calidad de la potencia.
- Establecer estrategias de compensación de potencias ineficientes. Si se entienden los flujos de potencia en los sistemas eléctricos, es posible establecer estrategias de compensación correctas. Establecer si se requiere el uso de filtros pasivos y/o compensadores activos, conectados en serie y/o paralelo.

En la IEEE Std. 1459-2010, se usa la teoría de la potencia instantánea para sistemas eléctricos monofásicos lineales. A partir de esta teoría, el grupo de trabajo del estándar definen la potencia activa instantánea fundamental ($p_{a1}(t)$, ecuación (1.7)), y la potencia reactiva instantánea fundamental ($p_{q1}(t)$, ecuación (1.9)). El valor medio de $p_{a1}(t)$, corresponde a la potencia activa fundamental (P_1 , ecuación (1.8)). El flujo $p_{a1}(t)$ se considera eficiente ya que su valor medio es positivo, esto significa que el flujo $p_{a1}(t)$ es unidireccional y fluye desde la red de suministro hacia la carga. El valor medio de $p_{q1}(t)$ es nulo, esto significa que existe un flujo bidireccional (ineficiente) de potencia entre la red de suministro y la carga, por lo que el intercambio de potencia es cero. Debido a que el intercambio de potencia es cero, el flujo de $p_{q1}(t)$ es considerado ineficiente y sólo ocasiona pérdidas de potencia cuando fluye por el sistema eléctrico. Debido a que el valor medio $p_{q1}(t)$ es cero, para cuantificar el flujo de $p_{q1}(t)$ utilizan su amplitud (Q_1 , ecuación (1.10)).

Para sistemas eléctricos monofásicos no lineales, la IEEE Std. 1459-2010 muestra una expresión de potencia activa instantánea ($p_a(t)$, ecuación (1.20)). $p_a(t)$ contiene términos de potencia instantánea fundamentales y no fundamentales. El valor medio de $p_a(t)$ es positivo y agrupa a P_1 y a la potencia activa armónica (P_H , ecuación (1.23)). A pesar de que P_H corresponde a un flujo unidireccional de la red de suministro a la carga, es considerado ineficiente, ya que provoca pérdidas de potencia en los conductores, es muy perjudicial para las cargas electrónicas sensibles, y ocasiona problemas de estabilidad en motores y generadores [43]. En la IEEE Std. 1459-2010, también es definida la potencia reactiva instantánea ($p_q(t)$, ecuación (1.21)). Al igual que $p_a(t)$, la potencia $p_q(t)$ contiene términos de potencia instantánea fundamentales y no fundamentales. El valor medio de $p_q(t)$ es cero, por lo que el flujo de potencia es bidireccional y

no representa una transferencia neta de potencia a la carga, por esta razón es considerado ineficiente. Para cuantificar el flujo de potencia de $p_q(t)$ es utilizada su amplitud (Q , ecuación (1.24)).

Para sistemas eléctricos trifásicos, la IEEE Std. 1459-2010 define una expresión de potencia instantánea trifásica basada en la suma del producto de voltajes y corrientes instantáneos de cada fase ($p(t)$, ecuación (1.47)). El valor medio de $p(t)$ es positivo y corresponde a la potencia activa trifásica (P , ecuación (1.48)). Para deducir el resto de potencias definidas en la IEEE Std. 1459-2010, no se utiliza la teoría de la potencia instantánea. Estas potencias son definidas basadas en un criterio de similitud con las ecuaciones previamente deducidas.

Aprovechando el análisis de la teoría de la potencia instantánea utilizada en la IEEE Std. 1459-2010, los siguientes teoremas son enunciados:

1. Si el valor medio de la potencia instantánea es positivo, existen flujos unidireccionales de potencia desde la red de suministro hacia la carga habiendo transferencia de potencia activa (P_1^+ , P_1^- , P_1^0 , y P_H).
2. Si existe una parte de la potencia instantánea con el valor medio igual a cero, existe un flujo bidireccional (ineficiente) de potencia entre la red de suministro y la carga, en este caso no existe intercambio de potencia. La transferencia de potencia se considera ineficiente, ya que sólo causas pérdidas de potencia cuando el flujo circula por los sistemas eléctricos.
3. Si el valor de la potencia instantánea trifásica es cero, pueden existir flujos de potencia monofásicos en las tres fases que se anulan entre si, en este caso no existe intercambio de potencia. La transferencia de potencia se considera ineficiente, ya que sólo causas pérdidas de potencia cuando estos flujos circulan por los sistemas eléctricos.
4. Cuando existe transferencia de potencia, las componentes de potencia instantánea son consideradas eficientes sólo cuando están compuestas por componentes fundamentales y de secuencia directa. Las componentes no fundamentales, a pesar de representar transferencias de potencia a la carga, son considerados ineficientes por los problemas que ocasionan en los sistemas eléctricos.

En este capítulo se extenderá la teoría de la potencia instantánea de la IEEE Std. 1459-2010 usada en sistemas eléctricos monofásicos a sistemas eléctricos trifásicos. Se explicaran, con ayuda de los flujos de energía, los fenómenos físicos en este tipo de sistemas bajo condiciones lineales, no lineales, equilibradas y no equilibradas. De acuerdo a lo expuesto anteriormente, la potencia instantánea por fase ($p_z(t)$) puede verse en la expresión (2.1) y la potencia instantánea trifásica ($p(t)$) puede verse en la expresión (2.2):

$$p_z(t) = v_z(t) i_z(t) \quad (2.1)$$

$$p(t) = \sum_{z=a,b,c} v_z(t) i_z(t) \quad (2.2)$$

Generalmente al multiplicar voltajes y corrientes instantáneas en las ecuaciones de potencia aparecen términos cuadráticos sinusoidales, con los que no es posible explicar el flujo de potencia del sistema ni mucho menos identificar que flujos son eficientes o ineficientes. En este capítulo se obtendrán expresiones de potencia instantánea a partir de la descomposición de sus términos cuadráticos en términos sinusoidales puros. Estas nuevas expresiones de potencia instantánea tienen interpretación física y con ellas es posible realizar la cuantificación de la potencia eléctrica.

El estudio que se realizará en la tesis no pretende cambiar los conceptos que se han discutido y analizado durante más de 50 años, sólo pretende explicar estos conceptos, darles significado físico, y establecer relaciones de coherencia entre las expresiones de voltaje, corriente y potencia. Tradicionalmente la cuantificación de potencia se realiza mediante el producto de voltajes y corrientes rms, en este trabajo esta tendencia se conservará pero se interpretará el significado.

Se propondrán expresiones de potencia instantánea para sistemas lineales, no lineales, equilibrados y desequilibrados. Las expresiones de potencia instantánea al ser deducidas a partir del producto de voltajes y corrientes instantáneas reflejan lo que sucede en cada instante de tiempo en el sistema de potencia, lo que las convierte en expresiones valiosas que pueden ser usadas en filtros y compensadores activos.

En base a la teoría de la potencia instantánea, este capítulo se divide de la siguiente manera: en la sección 2.1, se realizará la cuantificación de potencia para sistemas lineales y equilibrados. En la sección 2.2, se realizará la cuantificación de potencia para sistemas lineales y desequilibrados. En la sección 2.3, se realizará la cuantificación de potencia para sistemas no lineales, equilibrados o desequilibrados. En la sección 2.4, se deduce la expresión de potencia instantánea que contempla todos los casos anteriores.

2.1. Cuantificación de potencia para sistemas lineales y equilibrados.

En este caso debido a que el sistema es lineal y equilibrado sólo existen componentes fundamentales de voltaje de secuencia positiva ($V_{a1}=V_{b1}=V_{c1}=V_1^+$), y de corriente de secuencia positiva ($I_{a1}=I_{b1}=I_{c1}=I_1^+$). Las expresiones de voltaje y corriente instantáneo para esta situación fueron definidas en las ecuaciones (1.45) y (1.46) respectivamente, así que llevándolas a la ecuación (2.1), la potencia instantánea fundamental ($p_{z1}(t)$) puede expresarse como sigue:

$$p_{z1}(t) = v_{z1}^+(t) i_{z1}^+(t) = 2V_1^+ I_1^+ \sin(\omega_1 t - \varphi_z) \sin(\omega_1 t - \varphi_z + \beta_1^+) \quad (2.3)$$

Siguiendo el procedimiento de la sección 1.1.1, $p_{z1}(t)$ puede transformarse análogamente como sigue:

$$p_{z1}(t) = V_1^+ I_1^+ \cos(\theta_1^+) [1 - \cos(2(\omega_1 t - \varphi_z))] - V_1^+ I_1^+ \sin(\theta_1^+) \sin(2(\omega_1 t - \varphi_z)) \quad (2.4)$$

El primer término de la ecuación (2.4) está compuesto por una parte constante y una función cosenoidal, este término, por sus características, será llamado potencia activa instantánea por fase ($p_{z1p}(t)$) y su expresión está dada por:

$$p_{z1p}(t) = V_1^+ I_1^+ \cos(\theta_1^+) [1 - \cos(2(\omega_1 t - \varphi_z))] \quad (2.5)$$

El segundo término de la ecuación (2.4) es una función sinusoidal de amplitud constante, este término por sus características, será llamado potencia reactiva instantánea por fase ($p_{z1q}(t)$) y su expresión está dada por:

$$p_{z1q}(t) = -V_1^+ I_1^+ \sin(\theta_1^+) \sin(2(\omega_1 t - \varphi_z)) \quad (2.6)$$

Con el fin de mostrar las características de la potencia instantánea por fase, en la figura 2-1 se muestra la potencia instantánea activa, reactiva y total de la fase a ($p_{a1p}(t)$, $p_{a1q}(t)$, y $p_{a1}(t)$ respectivamente), para valores de tensión y corriente de magnitud unitaria y un desfase $\theta_1^+ = 60^\circ$. Como puede verse, $p_{a1p}(t)$ es una función sinusoidal de valor siempre positivo, por lo que representa un flujo unidireccional de potencia desde la red de suministro hacia la carga. $p_{a1q}(t)$ es una función sinusoidal de valor medio nulo, por lo que representa un flujo bidireccional (ineficiente) entre la red de suministro y la carga.

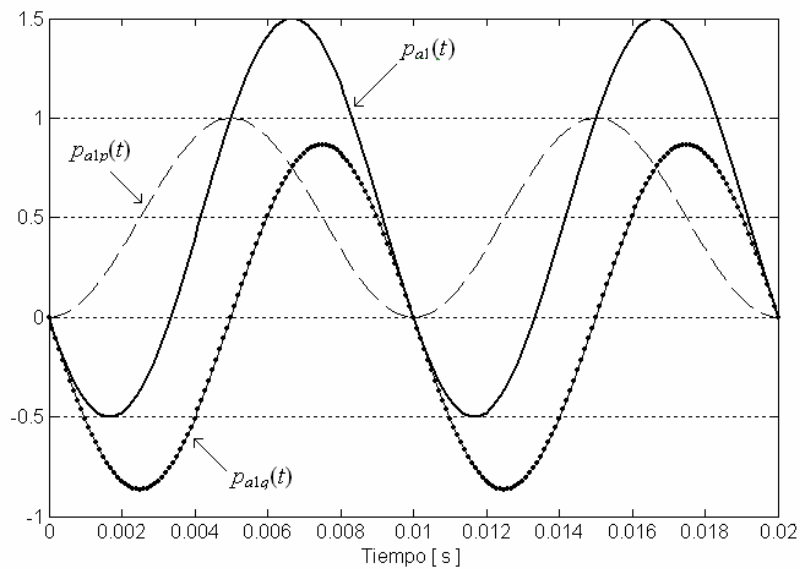


Figura 2-1. Componentes de potencia instantánea para un sistema lineal, equilibrado (fase a).

La potencia instantánea activa trifásica ($p_{1p}(t)$) puede obtenerse mediante la suma de las potencias instantáneas activas por fase, ecuación (2.7):

$$p_{1p}(t) = \sum_{z=a,b,c} p_{z1p}(t) \quad (2.7)$$

$$p_{1p}(t) = V_1^+ I_1^+ \cos(\theta_1^+) \left[[1 - \cos(2\omega_1 t)] + [1 - \cos(2(\omega_1 t - 2\pi/3))] + [1 - \cos(2(\omega_1 t - 4\pi/3))] \right] \quad (2.8)$$

$$p_{1p}(t) = 3V_1^+ I_1^+ \cos(\theta_1^+) \quad (2.9)$$

Como se observa, $p_{1p}(t)$ es un valor constante, ya que se cancelan entre sí los términos cosenoidales dependientes del tiempo y su valor es el triple de la potencia instantánea activa de cualquiera de las fases del sistema trifásico equilibrado. La potencia instantánea reactiva trifásica ($p_{1q}(t)$), está formada por la suma de las potencias instantáneas reactivas por fase, y debido a que se trata de un sistema de tensiones senoidales de valor medio igual a cero y desfasadas $2\pi/3$ entre sí, que al sumarse entre ellas dan igual a cero en cualquier instante:

$$p_{1q}(t) = \sum_{z=a,b,c} p_{z1q}(t) \quad (2.10)$$

$$p_{1q}(t) = -V_1^+ I_1^+ \sin(\theta_1^+) \left[\sin(2\omega_1 t) + \sin(2(\omega_1 t - 2\pi/3)) + \sin(2(\omega_1 t - 4\pi/3)) \right] = 0 \quad (2.11)$$

De esta manera, $p_1(t)$ en este caso coincide con $p_{1p}(t)$, así que, la potencia instantánea en un sistema trifásico equilibrado y lineal es constante e igual a tres veces la potencia activa de una de las fases:

$$p_1(t) = p_{1p}(t) + p_{1q}(t) = 3V_1^+ I_1^+ \cos(\theta_1^+) \quad (2.12)$$

En la figura 2-2 se muestran la potencia instantánea por fase y potencia instantánea trifásica del sistema, como puede verse la potencia instantánea por fase es una función sinusoidal de valor medio positivo y la potencia instantánea trifásica es un valor constante positivo.

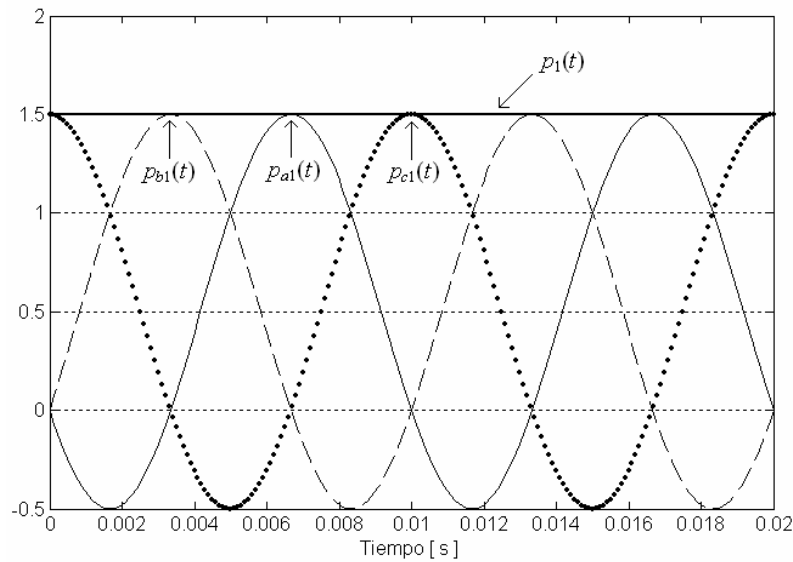


Figura 2-2. Potencias instantáneas por fase y potencia trifásica para un sistema lineal y equilibrado.

$p_1(t)$ es un valor constante en el tiempo de valor medio diferente a cero, por lo tanto, es la potencia útil que es entregada de la red de suministro a la carga y coincide con la potencia activa (P) del sistema. Además, de acuerdo a las características del voltaje y la corriente, P en este caso, es la potencia activa fundamental de secuencia positiva (P_1^+) y puede definirse como sigue:

$$P = P_1^+ = 3V_1^+ I_1^+ \cos(\theta_1^+) \quad (2.13)$$

La expresión de potencia activa (2.13) coincide con la expresión de potencia activa definida por la IEEE Std. 1459-2010, ecuación (1.48) de la tesis.

En la expresión de la potencia instantánea (2.12), se puede observar que no aparece ningún término que indique la presencia de flujos de energía reactiva entre la red de suministro y la carga, aunque como se dedujo en (2.11), existen tres términos de la potencia instantánea que representan flujos de energía bidireccionales, desfasados $2\pi/3$ entre sí, que corresponden a las potencias reactivas instantáneas de cada fase y que al sumarse entre sí mismas se anulan, no reflejándose en la expresión final de la potencia instantánea. De acuerdo al análisis realizado, la potencia reactiva trifásica (Q) que en este caso coincide con la potencia reactiva fundamental de secuencia positiva (Q_1^+) se puede definir a partir de la suma de las amplitudes de las potencias instantáneas bidireccionales de cada fase:

$$Q = Q_1^+ = Q_a^+ + Q_b^+ + Q_c^+ = 3V_1^+ I_1^+ \sin(\theta_1^+) \quad (2.14)$$

La potencia aparente del sistema (S) coincide con la potencia aparente de secuencia positiva (S_1^+) y está dada por:

$$(S) = (S_1^+)^2 = (P_1^+)^2 + (Q_1^+)^2 = (3V_1^+ I_1^+)^2 \quad (2.15)$$

Es posible ver que para sistemas trifásicos lineales y equilibrados las expresiones de potencia obtenidas tras el análisis realizado con la teoría de la potencia instantánea coinciden con las definiciones establecidas en la norma IEEE Std. 1459-2010.

2.2. Cuantificación de potencia para sistemas lineales con voltajes simétricos y corrientes desequilibradas.

En este caso los voltajes son senoidales y simétricos de frecuencia fundamental, así que sólo existen componentes de voltaje rms de secuencia positiva ($V_{a1}=V_{b1}=V_{c1}=V_1^+$) ($\varphi_a=0$, $\varphi_b=2\pi/3$, $\varphi_c=4\pi/3$), de acuerdo a esta condición el voltaje instantáneo por fase es:

$$v_{z1}(t) = v_{z1}^+(t) = \sqrt{2}V_1^+ \sin(\omega_1 t - \varphi_z) \quad (2.16)$$

Las corrientes son senoidales y desequilibradas de frecuencia fundamental ($I_{a1} \neq I_{b1} \neq I_{c1}$), y pueden expresarse en términos de las componentes simétricas (I_1^+ , I_1^- , e I_1^0), como sigue:

$$i_{z1}(t) = i_{z1}^+(t) + i_{z1}^-(t) + i_{z1}^0(t) \quad (2.17)$$

Donde $i_{z1}^+(t)$ es la corriente instantánea fundamental de secuencia positiva por fase, $i_{z1}^-(t)$ es la corriente instantánea fundamental de secuencia negativa por fase, e $i_{z1}^0(t)$ es la corriente instantánea fundamental de secuencia cero por fase:

$$i_{z1}^+(t) = \sqrt{2}I_{z1}^+ \text{sen}(\omega_1 t - \varphi_z + \beta_{z1}^+) \quad (2.18)$$

$$i_{z1}^-(t) = \sqrt{2}I_{z1}^- \text{sen}(\omega_1 t + \varphi_z + \beta_{z1}^-) \quad (2.19)$$

$$i_{z1}^0(t) = \sqrt{2}I_{z1}^0 \text{sen}(\omega_1 t + \beta_{z1}^0) \quad (2.20)$$

Llevando (2.16) y (2.17) a (2.1) la potencia instantánea por fase es:

$$p_z(t) = v_{z1}(t)i_{z1}(t) = v_{z1}^+(t)i_{z1}^+(t) + v_{z1}^+(t)i_{z1}^-(t) + v_{z1}^+(t)i_{z1}^0(t) \quad (2.21)$$

El primer término de (2.21) corresponde al producto del voltaje y la corriente instantánea de secuencia positiva y su análisis es idéntico al análisis de la sección anterior. El segundo término de (2.21) corresponde a la potencia instantánea por fase producida por un voltaje instantáneo de secuencia positiva con una corriente instantánea de secuencia negativa ($p_z^{+-}(t)$). El tercer término de (2.21) corresponde a la potencia instantánea por fase producida por un voltaje instantáneo de secuencia positiva y una corriente instantánea de secuencia cero ($p_z^{+0}(t)$).

A continuación será desarrollada la expresión $p_z^{+-}(t)$ para encontrar sus componentes. $p_z^{+-}(t)$ está dada por:

$$p_z^{+-}(t) = v_{z1}^+(t) i_{z1}^-(t) = 2V_1^+ I_1^- \text{sen}(\omega_1 t - \varphi_z) \text{sen}(\omega_1 t + \varphi_z + \beta_{z1}^-) \quad (2.22)$$

Simplificando, la expresión (2.22) puede escribirse como sigue:

$$p_z^{+-}(t) = V_1^+ I_1^- \cos(\theta_1^- + 2\varphi_z) - V_1^+ I_1^- \cos(2\omega_1 t + \theta_1^-) \quad (2.23)$$

Esta ecuación contiene dos componentes de potencia instantánea por fase y su valor medio es no nulo. En la figura 2-3 se puede observar la representación gráfica de las componentes de la potencia instantánea producida por corrientes de secuencia negativa en la fase a para valores unitarios de tensión y corriente y sin desfase entre ellos ($\theta_1^0=0$).

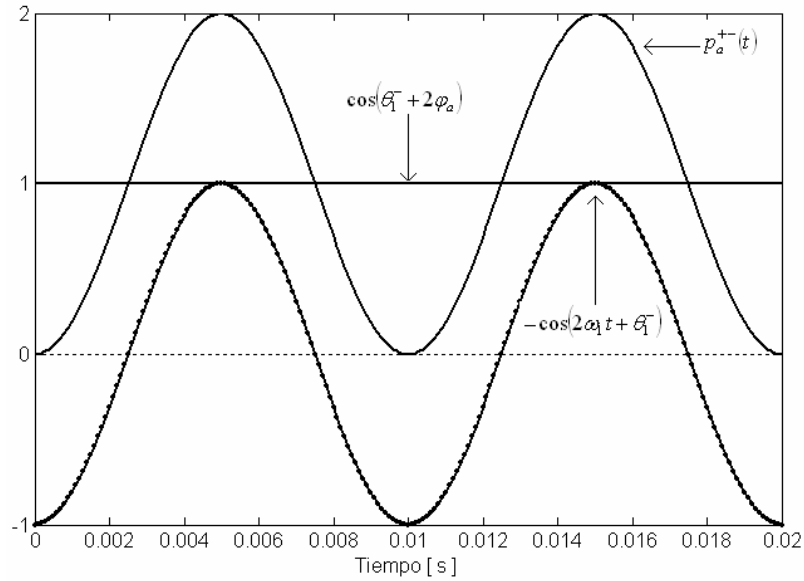


Figura 2-3. Potencias instantáneas por fase producida por una corriente de secuencia negativa

Partiendo de (2.23) y usando (2.2) se puede obtener la potencia instantánea trifásica provocada por corrientes de secuencia negativa ($p^{+-}(t)$).

$$p^{+-}(t) = V_1^+ I_1^- \left\{ \cos(\theta_1^-) + \cos\left(\theta_1^- + \frac{4\pi}{3}\right) + \cos\left(\theta_1^- + \frac{2\pi}{3}\right) - 3 \cos(2\omega_1 t + \theta_1^-) \right\} \quad (2.24)$$

De donde se obtiene que $p^{+-}(t)$ es:

$$p^{+-}(t) = -3V_1^+ I_1^- \cos(2\omega_1 t + \theta_1^-) \quad (2.25)$$

Su valor medio es nulo, por lo que, al igual que ocurría con la potencia reactiva instantánea, representa un flujo bidireccional (ineficiente) de energía que no se transforma en potencia útil y

por lo tanto representa una ineficiencia del sistema. En la figura 2-4 está representada la potencia instantánea de cada fase y la potencia instantánea trifásica producida por corrientes de secuencia negativa.

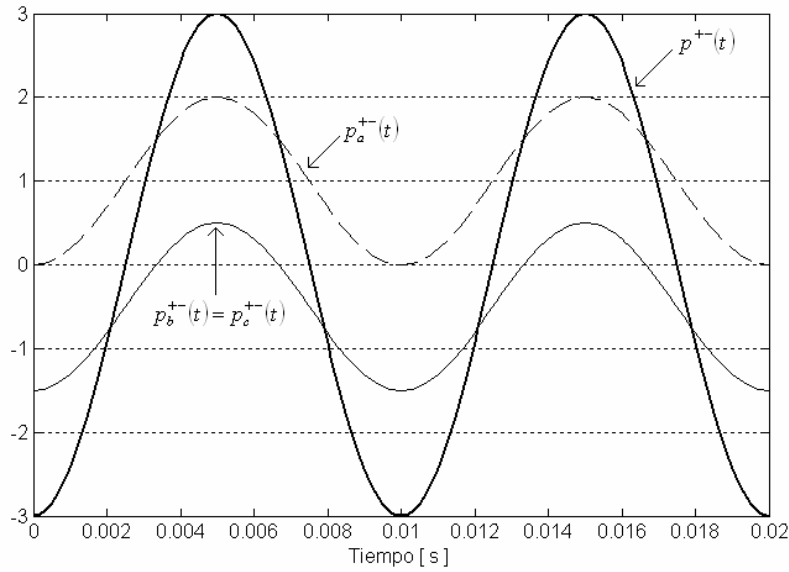


Figura 2-4. Potencias instantáneas de cada fase y potencia instantánea trifásica producidas por una corriente de secuencia negativa

Es preciso notar que a pesar de que existe potencia por fase cuyo valor medio es no nulo (potencia eficiente), este tipo de energía finalmente es ineficiente ya que desde el punto de vista trifásico, las potencias instantáneas de todas las fases se compensan y no hay transferencia útil de energía desde la red de suministro hacia la carga, solo existe un intercambio de energía producido por una potencia instantánea bidireccional (ineficiente).

Aplicando la teoría de la potencia instantánea, se propone la cuantificación de la potencia debido a la presencia de corrientes fundamentales de secuencia negativa, al igual que se ha hecho con la potencia debido a los desfases, como la suma de las amplitudes de $p_z^{+-}(t)$ de cada una de las fases.

$$A_i = \sum_{z=a,b,c} \max[p_z^{+-}(t)] = 3V_1^+ I_1^- \quad (2.26)$$

donde A_i corresponde con uno de los términos que aparecen en la expresión de $S_{U1\#}$ (Ec. (1.145)). En este caso la cuantificación de potencia usando la teoría de la potencia instantánea coincide con la cuantificación de potencia usando el procedimiento propuesto en la sección 1.2.3.4.

$p_z^{+0}(t)$, el tercer término de (2.21) está dado por:

$$p_z^{+0}(t) = v_{z1}^+(t)i_{z1}^0(t) = 2V_1^+I_1^0 \text{sen}(\omega_1 t - \varphi_z) \text{sen}(\omega_1 t + \beta_{z1}^0) \quad (2.27)$$

La expresión (2.27) puede transformarse fácilmente de la siguiente manera:

$$p_z^{+0}(t) = V_1^+I_1^0 \cos(\theta_1^0 + \varphi_z) - V_1^+I_1^0 \cos(2\omega_1 t - \varphi_z + \theta_1^0) \quad (2.28)$$

Esta ecuación representa los componentes de potencia instantánea individuales por fase y su valor medio es no nulo, así que, partiendo de (2.28) y usando (2.2) se puede obtener la potencia instantánea trifásica producida por corrientes de secuencia cero ($p^{+0}(t)$).

$$p^{+0}(t) = V_1^+I_1^0 \left\{ \begin{array}{l} \cos(\theta_1^0) + \cos(\theta_1^0 + 2\pi/3) + \cos(\theta_1^0 + 4\pi/3) + \\ -\cos(2\omega_1 t + \theta_1^0) - \cos(2\omega_1 t - 2\pi/3 + \theta_1^0) - \cos(2\omega_1 t - 4\pi/3 + \theta_1^0) \end{array} \right\} \quad (2.29)$$

De donde se obtiene que $p^{+0}(t)$ en todo instante de tiempo es cero:

$$p^{+0}(t) = 0 \quad (2.30)$$

El valor en cualquier instante es nulo, aunque el fenómeno este presente en el sistema, por lo que, existen unos flujos de energía circulando por cada una de las fases que sumados entre si representan a un flujo de energía nulo. Es por ello que dichos flujos de energía de cada fase no se transforman en potencia útil (se anulan entre si) y por lo tanto representan una ineficiencia del sistema asociada al desequilibrio de la carga (asimetría). En la figura 2-5 se muestran las potencias instantáneas individuales en cada fase y total asociada a la componente de secuencia cero de la corriente.

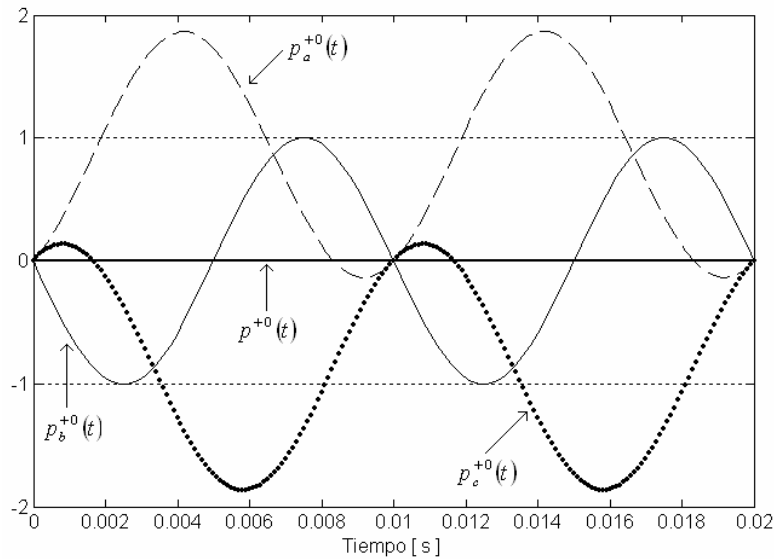


Figura 2-5. Potencias instantáneas de cada fase y potencia instantánea trifásica producidas por una corriente de secuencia cero

La potencia debido a la presencia de corrientes fundamentales de secuencia cero puede cuantificarse, al igual que se ha hecho con la potencia debido a los desfases, como la suma de las amplitudes de $p_z^{+0}(t)$ de cada una de las fases.

$$A_u = \sum_{z=a,b,c} \max[p_z^{+0}(t)] = 3V_1^+ I_1^0 \quad (2.31)$$

donde A_u corresponde con uno de los términos que aparecen en la expresión de $S_{U1\#}$ (Ec. (1.145)). Con la teoría de la potencia instantánea, se obtienen los términos A_i y A_u que cuantifican el efecto provocado por las corrientes desequilibradas demandadas por la carga. Los términos de A_i y A_u se corresponden con los términos que componen a $S_{U1\#}$, por lo que, para cuantificar la potencia ineficiente cuando existen desequilibrios en las corrientes de la carga con la teoría de la potencia instantánea se obtiene una cuantificación equivalente a la cuantificación propuesta en la sección 1.2.3.4.

2.3. Cuantificación de potencia para sistemas con cargas no lineales.

El sistema eléctrico trifásico con cargas no lineales bajo análisis puede verse en la figura 2-6. La tensión de suministro es sinusoidal pura y la carga es no lineal y demanda del sistema eléctrico armónicos de corriente. El procedimiento matemático para obtener la expresión de potencia instantánea es explicado con detalle a continuación.

La expresión de la tensión instantánea por fase ($v_{z1}(t)$) puede escribirse como sigue:

$$v_{z1}(t) = \sqrt{2}V_{z1} \text{sen}(\omega_1 t - \varphi_z) \quad (2.32)$$

La carga no lineal que puede modelarse en función de la corriente instantánea por fase ($i_{zh}(t)$) como sigue:

$$i_{zh}(t) = \sqrt{2} \sum_{h=1}^{\infty} I_{zh} \text{sen}(h\omega_1 t - \varphi_z + \beta_{zh}) \quad (2.33)$$

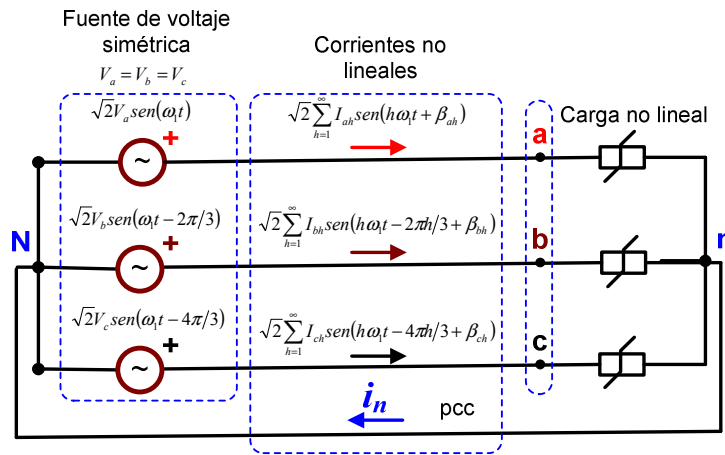


Figura 2-6. Sistema trifásico a 4 hilos, para sistemas con cargas no lineales

La potencia armónica instantánea por fase ($p_{zh}(t)$), puede obtenerse a partir del producto entre $v_{z1}(t)$ e $i_{zh}(t)$:

$$p_{zh}(t) = v_{z1}i_{zh} = \left[\sqrt{2}V_{z1} \text{sen}(\omega_1 t - \varphi_z) \right] \left[\sqrt{2} \sum_{h=1}^{\infty} I_{zh} \text{sen}(h(\omega_1 t - \varphi_z) + \beta_{zh}) \right] \quad (2.34)$$

Con el objetivo de simplificar un poco el procedimiento matemático a desarrollar, solo una de las componentes armónicas de corriente de la carga será incluida. En la expresión final de potencia instantánea, teniendo en cuenta el teorema de superposición, todas las componentes de corriente de la carga serán incluidas. Así que la potencia instantánea para un sólo armónico de corriente en la carga es:

$$p_{zh}(t) = 2V_{z1}I_{zh} \text{sen}(\omega_1 t - \varphi_z) \text{sen}(h(\omega_1 t - \varphi_z) + \beta_{zh}) \quad (2.35)$$

Relacionando los dos factores sinusoidales de (2.35), el segundo factor sinusoidal puede expresarse como sigue:

$$p_{zh}(t) = 2V_{z1}I_{zh} \text{sen}(\omega_1 t - \varphi_z) \left[\text{sen}((\omega_1 t - \varphi_z) + (h-1)(\omega_1 t - \varphi_z) + \beta_{zh}) \right] \quad (2.36)$$

Las identidades trigonométricas para la suma de ángulos son:

$$\begin{cases} \text{sen}(x \pm y) = \text{sen}(x)\cos(y) \pm \cos(x)\text{sen}(y) \\ \cos(x \pm y) = \cos(x)\cos(y) \mp \text{sen}(x)\text{sen}(y) \end{cases} \quad (2.37)$$

Partiendo de (2.37) se desarrolla (2.36) de la siguiente forma:

$$\text{sen}[\{(\omega_1 t - \varphi_z) + (h-1)(\omega_1 t - \varphi_z)\} + \beta_{zh}] = \left[\text{sen}[(\omega_1 t - \varphi_z) + (h-1)(\omega_1 t - \varphi_z)]\cos(\beta_{zh}) + \right. \\ \left. + \cos[(\omega_1 t - \varphi_z) + (h-1)(\omega_1 t - \varphi_z)]\text{sen}(\beta_{zh}) \right] \quad (2.38)$$

Reemplazando (2.38) en (2.36) se obtiene:

$$p_{zh}(t) = 2V_{z1}I_{zh} \text{sen}(\omega_1 t - \varphi_z) \left[\text{sen}[(\omega_1 t - \varphi_z) + (h-1)(\omega_1 t - \varphi_z)]\cos(\beta_{zh}) + \right. \\ \left. + \cos[(\omega_1 t - \varphi_z) + (h-1)(\omega_1 t - \varphi_z)]\text{sen}(\beta_{zh}) \right] \quad (2.39)$$

Aplicando (2.37) en las expresiones anteriores se obtiene:

$$\begin{cases} \text{sen}[\{(\omega_1 t - \varphi_z) + (h-1)(\omega_1 t - \varphi_z)\}] = \left[\text{sen}(\omega_1 t - \varphi_z)\cos[(h-1)(\omega_1 t - \varphi_z)] + \right. \\ \left. + \cos(\omega_1 t - \varphi_z)\text{sen}[(h-1)(\omega_1 t - \varphi_z)] \right] \\ \cos[\{(\omega_1 t - \varphi_z) + (h-1)(\omega_1 t - \varphi_z)\}] = \left[\cos(\omega_1 t - \varphi_z)\cos[(h-1)(\omega_1 t - \varphi_z)] + \right. \\ \left. - \text{sen}(\omega_1 t - \varphi_z)\text{sen}[(h-1)(\omega_1 t - \varphi_z)] \right] \end{cases} \quad (2.40)$$

Reemplazando (2.40) en (2.39):

$$p_{zh}(t) = 2V_{z1}I_{zh} \text{sen}(\omega_1 t - \varphi_z) \left[\left[\text{sen}(\omega_1 t - \varphi_z)\cos[(h-1)(\omega_1 t - \varphi_z)] + \right. \right. \\ \left. \left. + \cos(\omega_1 t - \varphi_z)\text{sen}[(h-1)(\omega_1 t - \varphi_z)] \right] \cos(\beta_{zh}) + \right. \\ \left. + \left[\cos(\omega_1 t - \varphi_z)\cos[(h-1)(\omega_1 t - \varphi_z)] + \right. \right. \\ \left. \left. - \text{sen}(\omega_1 t - \varphi_z)\text{sen}[(h-1)(\omega_1 t - \varphi_z)] \right] \text{sen}(\beta_{zh}) \right] \quad (2.41)$$

Multiplicando el primer factor sinusoidal de (2.41) con el factor entre corchetes se tiene:

$$p_{zh}(t) = 2V_{z1}I_{zh} \left[\begin{array}{l} \left[\begin{array}{l} \text{sen}^2(\omega_1 t - \varphi_z) \cos[(h-1)(\omega_1 t - \varphi_z)] + \\ + \text{sen}(\omega_1 t - \varphi_z) \cos(\omega_1 t - \varphi_z) \text{sen}[(h-1)(\omega_1 t - \varphi_z)] \end{array} \right] \cos(\beta_{zh}) + \\ + \left[\begin{array}{l} \text{sen}(\omega_1 t - \varphi_z) \cos(\omega_1 t - \varphi_z) \cos[(h-1)(\omega_1 t - \varphi_z)] + \\ - \text{sen}^2(\omega_1 t - \varphi_z) \text{sen}[(h-1)(\omega_1 t - \varphi_z)] \end{array} \right] \text{sen}(\beta_{zh}) \end{array} \right] \quad (2.42)$$

Las identidades para la reducción de términos son:

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{sen}^2(x) = \frac{1 - \cos(2x)}{2} \\ \text{sen}(x) \cos(x) = \frac{\text{sen}(2x)}{2} \end{array} \right\} \quad (2.43)$$

Aplicando (2.43) en algunos de los términos de (2.42) se obtiene:

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{sen}^2(\omega_1 t - \varphi_z) = \left[\frac{1 - \cos[2(\omega_1 t - \varphi_z)]}{2} \right] \\ \text{sen}(\omega_1 t - \varphi_z) \cos(\omega_1 t - \varphi_z) = \left[\frac{\text{sen}[2(\omega_1 t - \varphi_z)]}{2} \right] \end{array} \right\} \quad (2.44)$$

Reemplazando las identidades de (2.44) en (2.42) se obtiene:

$$p_{zh}(t) = 2V_{z1}I_{zh} \left[\begin{array}{l} \left\{ \left[\frac{1 - \cos[2(\omega_1 t - \varphi_z)]}{2} \right] \cos[(h-1)(\omega_1 t - \varphi_z)] + \right. \\ \left. + \left[\frac{\text{sen}[2(\omega_1 t - \varphi_z)]}{2} \right] \text{sen}[(h-1)(\omega_1 t - \varphi_z)] \right\} \cos(\beta_{zh}) + \\ + \left\{ \left[\frac{\text{sen}[2(\omega_1 t - \varphi_z)]}{2} \right] \cos[(h-1)(\omega_1 t - \varphi_z)] + \right. \\ \left. - \left[\frac{1 - \cos[2(\omega_1 t - \varphi_z)]}{2} \right] \text{sen}[(h-1)(\omega_1 t - \varphi_z)] \right\} \text{sen}(\beta_{zh}) \end{array} \right] \quad (2.45)$$

Expandiendo (2.45) y simplificando se tiene:

$$p_{zh}(t) = V_{z1}I_{zh} \left[\begin{array}{l} \left\{ \begin{array}{l} \cos[(h-1)(\omega_1 t - \varphi_z)] + \\ - \cos[2(\omega_1 t - \varphi_z)] \cos[(h-1)(\omega_1 t - \varphi_z)] + \\ + \text{sen}[2(\omega_1 t - \varphi_z)] \text{sen}[(h-1)(\omega_1 t - \varphi_z)] \end{array} \right\} \cos(\beta_{zh}) + \\ + \left\{ \begin{array}{l} \text{sen}[2(\omega_1 t - \varphi_z)] \cos[(h-1)(\omega_1 t - \varphi_z)] + \\ - \text{sen}[(h-1)(\omega_1 t - \varphi_z)] + \\ + \cos[2(\omega_1 t - \varphi_z)] \text{sen}[(h-1)(\omega_1 t - \varphi_z)] \end{array} \right\} \text{sen}(\beta_{zh}) \end{array} \right] \quad (2.46)$$

Aplicando las identidades de suma de ángulos (Ec. (2.37)) en algunos de los términos de (2.46) se obtiene:

$$\left\{ \begin{array}{l} \cos[2(\omega_1 t - \varphi_z)] = \cos(2\omega_1 t) \cos(2\varphi_z) + \text{sen}(2\omega_1 t) \text{sen}(2\varphi_z) \\ \text{sen}[2(\omega_1 t - \varphi_z)] = \text{sen}(2\omega_1 t) \cos(2\varphi_z) - \cos(2\omega_1 t) \text{sen}(2\varphi_z) \\ \cos[(h-1)(\omega_1 t - \varphi_z)] = \cos[(h-1)\omega_1 t] \cos[(h-1)\varphi_z] + \text{sen}[(h-1)\omega_1 t] \text{sen}[(h-1)\varphi_z] \\ \text{sen}[(h-1)(\omega_1 t - \varphi_z)] = \text{sen}[(h-1)\omega_1 t] \cos[(h-1)\varphi_z] - \cos[(h-1)\omega_1 t] \text{sen}[(h-1)\varphi_z] \end{array} \right\} \quad (2.47)$$

Reemplazando en (2.46) las identidades que aparecen en (2.47):

$$p_{zh}(t) = V_{z1} I_{zh} \left[\begin{aligned} & \left[\begin{aligned} & \left[\cos[(h-1)\omega_1 t] \cos[(h-1)\varphi_z] + \text{sen}[(h-1)\omega_1 t] \text{sen}[(h-1)\varphi_z] \right] + \\ & - \left[\cos(2\omega_1 t) \cos(2\varphi_z) + \text{sen}(2\omega_1 t) \text{sen}(2\varphi_z) \right] \times \\ & \times \left[\cos[(h-1)\omega_1 t] \cos[(h-1)\varphi_z] + \text{sen}[(h-1)\omega_1 t] \text{sen}[(h-1)\varphi_z] \right] \end{aligned} \right] + \cos(\beta_{zh}) + \\ & + \left[\begin{aligned} & \left[\text{sen}(2\omega_1 t) \cos(2\varphi_z) - \cos(2\omega_1 t) \text{sen}(2\varphi_z) \right] \times \\ & \times \left[\text{sen}[(h-1)\omega_1 t] \cos[(h-1)\varphi_z] - \cos[(h-1)\omega_1 t] \text{sen}[(h-1)\varphi_z] \right] \end{aligned} \right] \end{aligned} \right] \quad (2.48) \\ & + \left[\begin{aligned} & \left[\text{sen}(2\omega_1 t) \cos(2\varphi_z) - \cos(2\omega_1 t) \text{sen}(2\varphi_z) \right] \times \\ & \times \left[\cos[(h-1)\omega_1 t] \cos[(h-1)\varphi_z] + \text{sen}[(h-1)\omega_1 t] \text{sen}[(h-1)\varphi_z] \right] \end{aligned} \right] + \\ & + \left[\begin{aligned} & \left[\text{sen}[(h-1)\omega_1 t] \cos[(h-1)\varphi_z] - \cos[(h-1)\omega_1 t] \text{sen}[(h-1)\varphi_z] \right] + \text{sen}(\beta_{zh}) \\ & + \left[\cos(2\omega_1 t) \cos(2\varphi_z) + \text{sen}(2\omega_1 t) \text{sen}(2\varphi_z) \right] \times \\ & \times \left[\text{sen}[(h-1)\omega_1 t] \cos[(h-1)\varphi_z] - \cos[(h-1)\omega_1 t] \text{sen}[(h-1)\varphi_z] \right] \end{aligned} \right] \end{aligned} \right]$$

Realizando las operaciones indicadas en (2.48):

$$p_{zh}(t) = V_{z1} I_{zh} \left[\begin{aligned} & \left[\begin{aligned} & \left[\begin{aligned} & -\cos(2\omega_1 t) \cos[(h-1)\omega_1 t] \cos(2\varphi_z) \cos[(h-1)\varphi_z] + \\ & -\cos(2\omega_1 t) \text{sen}[(h-1)\omega_1 t] \cos(2\varphi_z) \text{sen}[(h-1)\varphi_z] + \\ & -\text{sen}(2\omega_1 t) \cos[(h-1)\omega_1 t] \text{sen}(2\varphi_z) \cos[(h-1)\varphi_z] + \\ & -\text{sen}(2\omega_1 t) \text{sen}[(h-1)\omega_1 t] \text{sen}(2\varphi_z) \text{sen}[(h-1)\varphi_z] \end{aligned} \right] + \\ & + \left[\cos[(h-1)\omega_1 t] \cos[(h-1)\varphi_z] + \text{sen}[(h-1)\omega_1 t] \text{sen}[(h-1)\varphi_z] \right] \end{aligned} \right] + \cos(\beta_{zh}) + \\ & + \left[\begin{aligned} & \left[\text{sen}(2\omega_1 t) \text{sen}[(h-1)\omega_1 t] \cos(2\varphi_z) \cos[(h-1)\varphi_z] + \\ & -\text{sen}(2\omega_1 t) \cos[(h-1)\omega_1 t] \cos(2\varphi_z) \text{sen}[(h-1)\varphi_z] + \\ & -\cos(2\omega_1 t) \text{sen}[(h-1)\omega_1 t] \text{sen}(2\varphi_z) \cos[(h-1)\varphi_z] + \\ & + \cos(2\omega_1 t) \cos[(h-1)\omega_1 t] \text{sen}(2\varphi_z) \text{sen}[(h-1)\varphi_z] \end{aligned} \right] \end{aligned} \right] \\ & + \left[\begin{aligned} & \left[\text{sen}(2\omega_1 t) \cos[(h-1)\omega_1 t] \cos(2\varphi_z) \cos[(h-1)\varphi_z] + \\ & + \text{sen}(2\omega_1 t) \text{sen}[(h-1)\omega_1 t] \cos(2\varphi_z) \text{sen}[(h-1)\varphi_z] + \\ & -\cos(2\omega_1 t) \cos[(h-1)\omega_1 t] \text{sen}(2\varphi_z) \cos[(h-1)\varphi_z] + \\ & -\cos(2\omega_1 t) \text{sen}[(h-1)\omega_1 t] \text{sen}(2\varphi_z) \text{sen}[(h-1)\varphi_z] \end{aligned} \right] + \\ & + \left[-\text{sen}[(h-1)\omega_1 t] \cos[(h-1)\varphi_z] + \cos[(h-1)\omega_1 t] \text{sen}[(h-1)\varphi_z] \right] \end{aligned} \right] + \text{sen}(\beta_{zh}) \\ & + \left[\begin{aligned} & \left[\cos(2\omega_1 t) \text{sen}[(h-1)\omega_1 t] \cos(2\varphi_z) \cos[(h-1)\varphi_z] + \\ & -\cos(2\omega_1 t) \cos[(h-1)\omega_1 t] \cos(2\varphi_z) \text{sen}[(h-1)\varphi_z] + \\ & + \text{sen}(2\omega_1 t) \text{sen}[(h-1)\omega_1 t] \text{sen}(2\varphi_z) \cos[(h-1)\varphi_z] + \\ & -\text{sen}(2\omega_1 t) \cos[(h-1)\omega_1 t] \text{sen}(2\varphi_z) \text{sen}[(h-1)\varphi_z] \end{aligned} \right] \end{aligned} \right] \end{aligned} \right]$$

Ecuación (2.49).

Después de descomponer $p(t)$ en factores sinusoidales puros, los factores que sean función del tiempo serán unidos con ayuda de las siguientes identidades trigonométricas:

$$\left\{ \begin{array}{l} \cos(x)\cos(y) = \frac{\cos(x+y) + \cos(x-y)}{2} \\ \operatorname{sen}(x)\operatorname{sen}(y) = \frac{\cos(x-y) - \cos(x+y)}{2} \\ \cos(x)\operatorname{sen}(y) = \frac{\operatorname{sen}(y+x) + \operatorname{sen}(y-x)}{2} \end{array} \right. \quad (2.50)$$

Aplicando las expresiones anteriores en los términos que aparecen en (2.49) se obtiene:

$$\left\{ \begin{array}{l} \cos(2\omega_1 t)\cos[(h-1)\omega_1 t] = \frac{\cos[(h+1)\omega_1 t] + \cos[(h-3)\omega_1 t]}{2} \\ \operatorname{sen}(2\omega_1 t)\operatorname{sen}[(h-1)\omega_1 t] = \frac{\cos[(h-3)\omega_1 t] - \cos[(h+1)\omega_1 t]}{2} \\ \cos(2\omega_1 t)\operatorname{sen}[(h-1)\omega_1 t] = \frac{\operatorname{sen}[(h+1)\omega_1 t] + \operatorname{sen}[(h-3)\omega_1 t]}{2} \\ \operatorname{sen}(2\omega_1 t)\cos[(h-1)\omega_1 t] = \frac{\operatorname{sen}[(h+1)\omega_1 t] - \operatorname{sen}[(h-3)\omega_1 t]}{2} \end{array} \right. \quad (2.51)$$

Combinando las identidades mostradas en (2.51) con la expresión (2.49), la potencia instantánea es:

$$p_{zh}(t) = V_{z1} I_{zh} \left[\begin{aligned} & \left[\begin{aligned} & - \left[\frac{\cos[(h+1)\omega_1 t] + \cos[(h-3)\omega_1 t]}{2} \right] \cos(2\varphi_z) \cos[(h-1)\varphi_z] + \\ & - \left[\frac{\text{sen}[(h+1)\omega_1 t] + \text{sen}[(h-3)\omega_1 t]}{2} \right] \cos(2\varphi_z) \text{sen}[(h-1)\varphi_z] + \\ & - \left[\frac{\text{sen}[(h+1)\omega_1 t] - \text{sen}[(h-3)\omega_1 t]}{2} \right] \text{sen}(2\varphi_z) \cos[(h-1)\varphi_z] + \\ & - \left[\frac{\cos[(h-3)\omega_1 t] - \cos[(h+1)\omega_1 t]}{2} \right] \text{sen}(2\varphi_z) \text{sen}[(h-1)\varphi_z] \end{aligned} \right] + \\ & + \left[\cos[(h-1)\omega_1 t] \cos[(h-1)\varphi_z] + \text{sen}[(h-1)\omega_1 t] \text{sen}[(h-1)\varphi_z] \right] + \cos(\beta_{zh}) + \\ & + \left[\begin{aligned} & \left[\frac{\cos[(h-3)\omega_1 t] - \cos[(h+1)\omega_1 t]}{2} \right] \cos(2\varphi_z) \cos[(h-1)\varphi_z] + \\ & - \left[\frac{\text{sen}[(h+1)\omega_1 t] - \text{sen}[(h-3)\omega_1 t]}{2} \right] \cos(2\varphi_z) \text{sen}[(h-1)\varphi_z] + \\ & - \left[\frac{\text{sen}[(h+1)\omega_1 t] + \text{sen}[(h-3)\omega_1 t]}{2} \right] \text{sen}(2\varphi_z) \cos[(h-1)\varphi_z] + \\ & + \left[\frac{\cos[(h+1)\omega_1 t] + \cos[(h-3)\omega_1 t]}{2} \right] \text{sen}(2\varphi_z) \text{sen}[(h-1)\varphi_z] \end{aligned} \right] \\ & + \left[\begin{aligned} & \left[\frac{\text{sen}[(h+1)\omega_1 t] - \text{sen}[(h-3)\omega_1 t]}{2} \right] \cos(2\varphi_z) \cos[(h-1)\varphi_z] + \\ & + \left[\frac{\cos[(h-3)\omega_1 t] - \cos[(h+1)\omega_1 t]}{2} \right] \cos(2\varphi_z) \text{sen}[(h-1)\varphi_z] + \\ & - \left[\frac{\cos[(h+1)\omega_1 t] + \cos[(h-3)\omega_1 t]}{2} \right] \text{sen}(2\varphi_z) \cos[(h-1)\varphi_z] + \\ & - \left[\frac{\text{sen}[(h+1)\omega_1 t] + \text{sen}[(h-3)\omega_1 t]}{2} \right] \text{sen}(2\varphi_z) \text{sen}[(h-1)\varphi_z] \end{aligned} \right] + \\ & + \left[- \text{sen}[(h-1)\omega_1 t] \cos[(h-1)\varphi_z] + \cos[(h-1)\omega_1 t] \text{sen}[(h-1)\varphi_z] \right] + \text{sen}(\beta_{zh}) \\ & + \left[\begin{aligned} & \left[\frac{\text{sen}[(h+1)\omega_1 t] + \text{sen}[(h-3)\omega_1 t]}{2} \right] \cos(2\varphi_z) \cos[(h-1)\varphi_z] + \\ & - \left[\frac{\cos[(h+1)\omega_1 t] + \cos[(h-3)\omega_1 t]}{2} \right] \cos(2\varphi_z) \text{sen}[(h-1)\varphi_z] + \\ & + \left[\frac{\cos[(h-3)\omega_1 t] - \cos[(h+1)\omega_1 t]}{2} \right] \text{sen}(2\varphi_z) \cos[(h-1)\varphi_z] + \\ & - \left[\frac{\text{sen}[(h+1)\omega_1 t] - \text{sen}[(h-3)\omega_1 t]}{2} \right] \text{sen}(2\varphi_z) \text{sen}[(h-1)\varphi_z] \end{aligned} \right] \end{aligned} \right]$$

Ecuación (2.52).

Reduciendo términos semejantes:

$$p_{zh}(t) = V_{z1} I_{zh} \left[\begin{array}{l} \left\{ \begin{array}{l} \cos[(h-1)\omega_1 t] \cos[(h-1)\varphi_z] + \\ + \text{sen}[(h-1)\omega_1 t] \text{sen}[(h-1)\varphi_z] + \\ - \cos[(h+1)\omega_1 t] \cos(2\varphi_z) \cos[(h-1)\varphi_z] + \\ - \text{sen}[(h+1)\omega_1 t] \cos(2\varphi_z) \text{sen}[(h-1)\varphi_z] + \\ - \text{sen}[(h+1)\omega_1 t] \text{sen}(2\varphi_z) \cos[(h-1)\varphi_z] + \\ + \cos[(h+1)\omega_1 t] \text{sen}(2\varphi_z) \text{sen}[(h-1)\varphi_z] \end{array} \right\} \cos(\beta_{zh}) + \\ + \left\{ \begin{array}{l} \text{sen}[(h+1)\omega_1 t] \cos(2\varphi_z) \cos[(h-1)\varphi_z] + \\ - \cos[(h+1)\omega_1 t] \cos(2\varphi_z) \text{sen}[(h-1)\varphi_z] + \\ - \cos[(h+1)\omega_1 t] \text{sen}(2\varphi_z) \cos[(h-1)\varphi_z] + \\ - \text{sen}[(h+1)\omega_1 t] \text{sen}(2\varphi_z) \text{sen}[(h-1)\varphi_z] + \\ - \text{sen}[(h-1)\omega_1 t] \cos[(h-1)\varphi_z] + \\ + \cos[(h-1)\omega_1 t] \text{sen}[(h-1)\varphi_z] \end{array} \right\} \text{sen}(\beta_{zh}) \end{array} \right] \quad (2.53)$$

Con el objetivo de reducir un poco más la expresión de $p(t)$ y utilizando las identidades escritas en (2.50) se obtiene:

$$\left\{ \begin{array}{l} \cos(2\varphi_z) \cos[(h-1)\varphi_z] = \frac{\cos[(h+1)\varphi_z] + \cos[(h-3)\varphi_z]}{2} \\ \text{sen}(2\varphi_z) \text{sen}[(h-1)\varphi_z] = \frac{\cos[(h-3)\varphi_z] - \cos[(h+1)\varphi_z]}{2} \\ \cos(2\varphi_z) \text{sen}[(h-1)\varphi_z] = \frac{\text{sen}[(h+1)\varphi_z] + \text{sen}[(h-3)\varphi_z]}{2} \\ \text{sen}(2\omega_1 t) \cos[(h-1)\varphi_z] = \frac{\text{sen}[(h+1)\varphi_z] + \text{sen}[-(h+3)\varphi_z]}{2} \end{array} \right\} \quad (2.54)$$

Combinando las identidades de (2.54) en (2.53) se tiene:

$$p_{zh}(t) = V_{z1} I_{zh} \left[\begin{array}{l} \left\{ \begin{array}{l} \cos[(h-1)\omega_1 t] \cos[(h-1)\varphi_z] + \text{sen}[(h-1)\omega_1 t] \text{sen}[(h-1)\varphi_z] + \\ - \cos[(h+1)\omega_1 t] \left[\frac{\cos[(h+1)\varphi_z] + \cos[(h-3)\varphi_z]}{2} \right] + \\ - \text{sen}[(h+1)\omega_1 t] \left[\frac{\text{sen}[(h+1)\varphi_z] + \text{sen}[(h-3)\varphi_z]}{2} \right] + \\ - \text{sen}[(h+1)\omega_1 t] \left[\frac{\text{sen}[(h+1)\varphi_z] + \text{sen}[-(h+3)\varphi_z]}{2} \right] + \\ + \cos[(h+1)\omega_1 t] \left[\frac{\cos[(h-3)\varphi_z] - \cos[(h+1)\varphi_z]}{2} \right] \end{array} \right\} \cos(\beta_{zh}) + \\ + \left\{ \begin{array}{l} \text{sen}[(h+1)\omega_1 t] \left[\frac{\cos[(h+1)\varphi_z] + \cos[(h-3)\varphi_z]}{2} \right] + \\ - \cos[(h+1)\omega_1 t] \left[\frac{\text{sen}[(h+1)\varphi_z] + \text{sen}[(h-3)\varphi_z]}{2} \right] + \\ - \cos[(h+1)\omega_1 t] \left[\frac{\text{sen}[(h+1)\varphi_z] + \text{sen}[-(h+3)\varphi_z]}{2} \right] + \\ - \text{sen}[(h+1)\omega_1 t] \left[\frac{\cos[(h-3)\varphi_z] - \cos[(h+1)\varphi_z]}{2} \right] + \\ - \text{sen}[(h-1)\omega_1 t] \cos[(h-1)\varphi_z] + \cos[(h-1)\omega_1 t] \text{sen}[(h-1)\varphi_z] \end{array} \right\} \text{sen}(\beta_{zh}) \end{array} \right]$$

Ecuación (2.55).

Simplificando términos comunes:

$$p_{zh}(t) = V_{z1} I_{zh} \left[\begin{array}{l} \left\{ \begin{array}{l} \cos[(h-1)\omega_1 t] \cos[(h-1)\varphi_z] + \\ + \text{sen}[(h-1)\omega_1 t] \text{sen}[(h-1)\varphi_z] + \\ - \cos[(h+1)\omega_1 t] \cos[(h+1)\varphi_z] + \\ - \text{sen}[(h+1)\omega_1 t] \text{sen}[(h+1)\varphi_z] \end{array} \right\} \cos(\beta_{zh}) + \\ + \left\{ \begin{array}{l} \text{sen}[(h+1)\omega_1 t] \cos[(h+1)\varphi_z] + \\ - \cos[(h+1)\omega_1 t] \text{sen}[(h+1)\varphi_z] + \\ - \text{sen}[(h-1)\omega_1 t] \cos[(h-1)\varphi_z] + \\ + \cos[(h-1)\omega_1 t] \text{sen}[(h-1)\varphi_z] \end{array} \right\} \text{sen}(\beta_{zh}) \end{array} \right] \quad (2.56)$$

Utilizando las identidades escritas en (2.37), se pueden escribir las siguientes identidades:

$$\left\{ \begin{array}{l} \cos[(h-1)(\omega_1 t - \varphi_z)] = \cos[(h-1)\omega_1 t] \cos[(h-1)\varphi_z] + \text{sen}[(h-1)\omega_1 t] \text{sen}[(h-1)\varphi_z] \\ \cos[(h+1)(\omega_1 t - \varphi_z)] = \cos[(h+1)\omega_1 t] \cos[(h+1)\varphi_z] + \text{sen}[(h+1)\omega_1 t] \text{sen}[(h+1)\varphi_z] \\ \text{sen}[(h+1)(\omega_1 t - \varphi_z)] = \text{sen}[(h+1)\omega_1 t] \cos[(h+1)\varphi_z] - \cos[(h+1)\omega_1 t] \text{sen}[(h+1)\varphi_z] \\ \text{sen}[(h-1)(\omega_1 t - \varphi_z)] = \text{sen}[(h-1)\omega_1 t] \cos[(h-1)\varphi_z] - \cos[(h-1)\omega_1 t] \text{sen}[(h-1)\varphi_z] \end{array} \right\} \quad (2.57)$$

Reemplazando identidades de (2.57) en (2.56):

$$p_{zh}(t) = V_{z1} I_{zh} \left[\begin{aligned} & \{ \cos [(h-1)(\omega_1 t - \varphi_z)] - \cos [(h+1)(\omega_1 t - \varphi_z)] \} \cos (\beta_{zh}) + \\ & + \{ \text{sen} [(h+1)(\omega_1 t - \varphi_z)] - \text{sen} [(h-1)(\omega_1 t - \varphi_z)] \} \text{sen} (\beta_{zh}) \end{aligned} \right] \quad (2.58)$$

Realizando las operaciones indicadas en (2.58):

$$p_{zh}(t) = V_{z1} I_{zh} \left[\begin{aligned} & \cos [(h-1)(\omega_1 t - \varphi_z)] \cos (\beta_{zh}) - \text{sen} [(h-1)(\omega_1 t - \varphi_z)] \text{sen} (\beta_{zh}) + \\ & - \{ \cos [(h+1)(\omega_1 t - \varphi_z)] \cos (\beta_{zh}) - \text{sen} [(h+1)(\omega_1 t - \varphi_z)] \text{sen} (\beta_{zh}) \} \end{aligned} \right] \quad (2.59)$$

Utilizando de nuevo las identidades que aparecen en (2.37):

$$\left\{ \begin{aligned} \cos [(h-1)(\omega_1 t - \varphi_z) + \beta_{zh}] &= \cos [(h-1)(\omega_1 t - \varphi_z)] \cos (\beta_{zh}) - \text{sen} [(h-1)(\omega_1 t - \varphi_z)] \text{sen} (\beta_{zh}) \\ \cos [(h+1)(\omega_1 t - \varphi_z) + \beta_{zh}] &= \cos [(h+1)(\omega_1 t - \varphi_z)] \cos (\beta_{zh}) - \text{sen} [(h+1)(\omega_1 t - \varphi_z)] \text{sen} (\beta_{zh}) \end{aligned} \right\} \quad (2.60)$$

Reemplazando identidades de (2.60) en (2.59):

$$p_{zh}(t) = V_{z1} I_{zh} \{ \cos [(h-1)(\omega_1 t - \varphi_z) + \beta_{zh}] - \cos [(h+1)(\omega_1 t - \varphi_z) + \beta_{zh}] \} \quad (2.61)$$

Teniendo en cuenta todos los armónicos de corriente que pueden aparecer en el sistema, la ecuación (2.61) puede expresarse de la siguiente manera:

$$p_{zh}(t) = \sum_{h=1}^{\infty} (V_{z1} I_{zh} \{ \cos [(h-1)(\omega_1 t - \varphi_z) + \beta_{zh}] - \cos [(h+1)(\omega_1 t - \varphi_z) + \beta_{zh}] \}) \quad (2.62)$$

De acuerdo a (2.62), $p_{zh}(t)$ está compuesta por dos términos sinusoidales puros de diferente frecuencia y secuencia de rotación. La potencia instantánea armónica trifásica ($p_h(t)$) puede obtenerse si las contribuciones de cada fase son sumadas:

$$p_h(t) = \sum_{z=a,b,c} \left(\sum_{h=1}^{\infty} (V_{z1} I_{zh} \{ \cos [(h-1)(\omega_1 t - \varphi_z) + \beta_{zh}] - \cos [(h+1)(\omega_1 t - \varphi_z) + \beta_{zh}] \}) \right) \quad (2.63)$$

La expresión (2.63) es válida para cualquier carga no lineal, inclusive si esta carga es desequilibrada o si existen asimetrías de voltaje. Nótese que en la expresión (2.63) cada armónico h contribuye con dos términos sinusoidales de frecuencias angulares $(h-1)\omega_1$ y $(h+1)\omega_1$, además, cada término sinusoidal tiene una secuencia de rotación dada por $-(h-1)\varphi_z$ y $-(h+1)\varphi_z$, lo que indica que cada término sinusoidal de $p_h(t)$ tiene una secuencia rotación diferente a la secuencia de rotación del armónico de corriente h que lo generó ($-\varphi_z$). Para entender mejor el comportamiento de la potencia instantánea en los sistemas eléctricos, en la siguiente sección se explicaran algunos casos particulares.

En la IEEE Std. 1459-2010 aparecen definiciones para la medida de la potencia eléctrica bajo condiciones lineales, no lineales, equilibradas y desequilibradas con el objetivo de tomar decisiones económicas y determinar fuentes de distorsión armónica. Algunos autores han redefinido las expresiones que aparecen en la IEEE Std. 1459-2010 con el objetivo de explicar los fenómenos físicos y darle coherencia a las expresiones de potencia [23], [25]-[26]. Con la expresión de potencia instantánea deducida, es posible explicar los diferentes fenómenos que aparecen en el sistema de potencia, de este modo, es fácil distinguir las ineficiencias que se producen de acuerdo a la naturaleza de las fuentes de distorsión.

La naturaleza de las fuentes de distorsión pueden catalogarse de acuerdo a [42]. Para un sistema trifásico equilibrado existe una relación entre el orden de un armónico y la secuencia de rotación, para $n=0,1,2,3,\dots,\infty$, se cumple:

- Si el orden del armónico corresponde a $h=3n+1$, la secuencia de rotación es positiva $a-b-c$ ($0, -2\pi/3, -4\pi/3$), la frecuencia angular es $(3n+1)\omega_1$.
- Si el orden del armónico corresponde a $h=3n+2$, la secuencia de rotación es negativa $a-c-b$ ($0, -4\pi/3, -2\pi/3$), la frecuencia angular es $(3n+2)\omega_1$.
- Si el orden del armónico corresponde a $h=3n+3$, la secuencia de rotación es cero, en otras palabras, los fasores se encuentran en fase y sin rotación, la frecuencia angular es $(3n+3)\omega_1$.

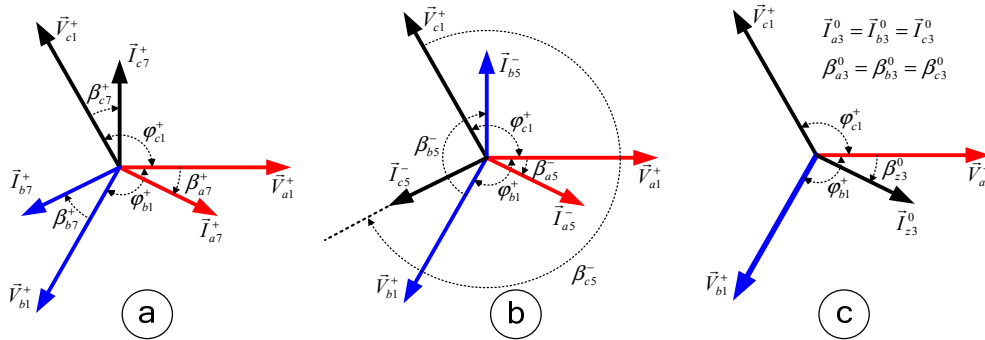


Figura 2-7. Secuencias de rotación.

2.3.1. Cuantificación de potencia para armónicos equilibrados de corriente de secuencia positiva.

Para el análisis de esta situación se supondrá que sólo existen componentes fundamentales simétricas de voltaje ($V_{a1}^+ = V_{b1}^+ = V_{c1}^+ = V_1^+$) y corrientes armónicas equilibradas de secuencia positiva ($I_{ah}^+ = I_{bh}^+ = I_{ch}^+ = I_h^+$), estos armónicos tienen la misma secuencia de rotación que la componente fundamental ($a-b-c$). Si la carga no lineal está compuesta por armónicos de corriente de secuencia positiva, el orden de los armónicos es $h=3n+1$ para $h>0$. Con el objetivo de entender la naturaleza de la potencia producida por las componentes positivas de corriente armónica, solo se tendrá en cuenta una de ellas, así que, reemplazando $h=3n+1$ en (2.61) la potencia instantánea de cada fase producida por uno de los armónicos de secuencia positiva es:

$$\begin{aligned}
 p_{ah}^+(t) &= V_{a1}^+ I_{ah}^+ \{ \cos [(3n)(\omega_1 t - \varphi_a) + \beta_{ah}] - \cos [(3n+2)(\omega_1 t - \varphi_a) + \beta_{ah}] \} \\
 p_{bh}^+(t) &= V_{b1}^+ I_{bh}^+ \{ \cos [(3n)(\omega_1 t - \varphi_b) + \beta_{bh}] - \cos [(3n+2)(\omega_1 t - \varphi_b) + \beta_{bh}] \} \\
 p_{ch}^+(t) &= V_{c1}^+ I_{ch}^+ \{ \cos [(3n)(\omega_1 t - \varphi_c) + \beta_{ch}] - \cos [(3n+2)(\omega_1 t - \varphi_c) + \beta_{ch}] \}
 \end{aligned}
 \tag{2.64}$$

La potencia de cada fase está compuesta básicamente por dos términos cosenoidales: el primero tiene una frecuencia angular de $3n\omega_1$, y el segundo tiene una frecuencia angular de $(3n+2)\omega_1$.

Así que, en cada fase existen dos componentes de potencia instantánea cuyo valor medio es nulo. La potencia instantánea trifásica puede obtenerse de (2.63):

$$p_h^+(t) = V_1^+ I_h^+ \left[\begin{array}{l} \left\{ \begin{array}{l} \cos [3n\omega_1 t - 3n\varphi_a + \beta_{zh}] + \\ + \cos [3n\omega_1 t - 3n\varphi_b + \beta_{zh}] + \\ \cos [3n\omega_1 t - 3n\varphi_c + \beta_{zh}] \end{array} \right\} + \\ - \left\{ \begin{array}{l} \cos [(3n+2)\omega_1 t - (3n+2)\varphi_a + \beta_{zh}] + \\ + \cos [(3n+2)\omega_1 t - (3n+2)\varphi_b + \beta_{zh}] + \\ + \cos [(3n+2)\omega_1 t - (3n+2)\varphi_c + \beta_{zh}] \end{array} \right\} \end{array} \right] \quad (2.65)$$

La secuencia de rotación para el primer término agrupado entre llaves de $p_h^+(t)$ está determinada por la expresión “ $-3n\varphi_z$ ” ($-3n\varphi_a = -3n\varphi_b = -3n\varphi_c = 0$). Se puede inferir que la secuencia de rotación de este primer término es cero, por lo tanto, el flujo de potencia trifásico de este primer término es bidireccional, fluyendo de la red de suministro hacia la carga y viceversa, produciendo pérdidas.

De la misma manera, la secuencia de rotación para el segundo término agrupado entre llaves está determinada por la expresión “ $-(3n+2)\varphi_z$ ” ($-(3n+2)\varphi_a = 0$, $-(3n+2)\varphi_b = -4\pi/3$, $-(3n+2)\varphi_c = -2\pi/3$), como se puede ver la secuencia de rotación para este término es negativa, por lo tanto, la potencia instantánea trifásica es nula considerándose ineficiente debido a que está compuesto por potencias instantáneas monofásicas de valor medio nulo.

Sumando los términos comunes de (2.65) y simplificando, se tiene:

$$p_h^+(t) = 3V_1^+ I_h^+ \cos [3n\omega_1 t + \beta_{zh}] \quad (2.66)$$

Como puede verse la $p_h^+(t)$ solo está formado por componentes de secuencia cero. Siguiendo la teoría de la potencia instantánea es posible la cuantificación de $S_{eN\#}$ cuando existen armónicos de corriente de secuencia positiva usando la amplitud de $p_h^+(t)$:

$$S_{eN\#} = 3V_1^+ I_h^+ \quad (2.67)$$

En un sistema de potencia, los armónicos de corriente más comunes cuya secuencia de rotación es positiva son el séptimo ($n=2$) y el treceavo ($n=4$). A continuación se mostrarán los resultados que se obtuvieron tras simular un sistema eléctrico como el de la figura 1-2. Para esto se utilizó la plataforma de Matlab/Simulink. Las condiciones establecidas para la simulación son:

- La tensión de suministro es senoidal, fundamental y simétrica ($V_{a1}^+ = V_{b1}^+ = V_{c1}^+ = V_1^+$).
- La carga está compuesta por el armónico 7 de la corriente ($I_{a7}^+ = I_{b7}^+ = I_{c7}^+ = I_7^+$).
- No existe desfase entre la tensión y la corriente de cada fase ($\beta_7^+ = 0^\circ$). Los resultados para otros valores de β_7^+ son análogos.
- La potencia aparente por unidad p.u está dada por el producto entre V_1^+ e I_7^+ ($S_e = V_1^+ I_7^+$).

La representación fasorial de la simulación a realizar se puede ver en la figura 2-7a. Reemplazando $n=2$ en (2.64), la potencia instantánea de cada fase $p_{z7}^+(t)$ producida por el 7º armónico de corriente es:

$$\begin{aligned} p_{a7}^+(t) &= V_1^+ I_7^+ \{ \cos(6\omega_1 t) - \cos(8\omega_1 t) \} \\ p_{b7}^+(t) &= V_1^+ I_7^+ \left\{ \cos(6\omega_1 t) - \cos\left(8\omega_1 t - \frac{4\pi}{3}\right) \right\} \\ p_{c7}^+(t) &= V_1^+ I_7^+ \left\{ \cos(6\omega_1 t) - \cos\left(8\omega_1 t - \frac{2\pi}{3}\right) \right\} \end{aligned} \quad (2.68)$$

La potencia trifásica en este caso puede ser obtenida de (2.65):

$$p_7^+(t) = 3V_1^+ I_7^+ \cos(3n\omega_1 t) \quad (2.69)$$

En este caso la cuantificación de $S_{eN\#}$ es:

$$S_{eN\#} = 3V_1^+ I_7^+ \quad (2.70)$$

Con el fin de representar la potencia instantánea por fase, en la figura 2-8 se muestra la potencia instantánea de la fase a en el sistema p.u. La potencia instantánea de cada fase está formado por dos potencias instantáneas bidireccionales. La primera potencia instantánea tiene una frecuencia de $6\omega_1$ y está ubicado en la parte superior de la figura 2-8. La segunda potencia instantánea tiene una frecuencia de $8\omega_1$ y está ubicado en el medio de la figura 2-8. La potencia instantánea por fase que es la contribución de las dos anteriores potencias está ubicado en la parte inferior de la figura 2-8. El valor máximo $p_{z7}^+(t)$ es inferior a 2 p.u y el valor mínimo es -2 p.u

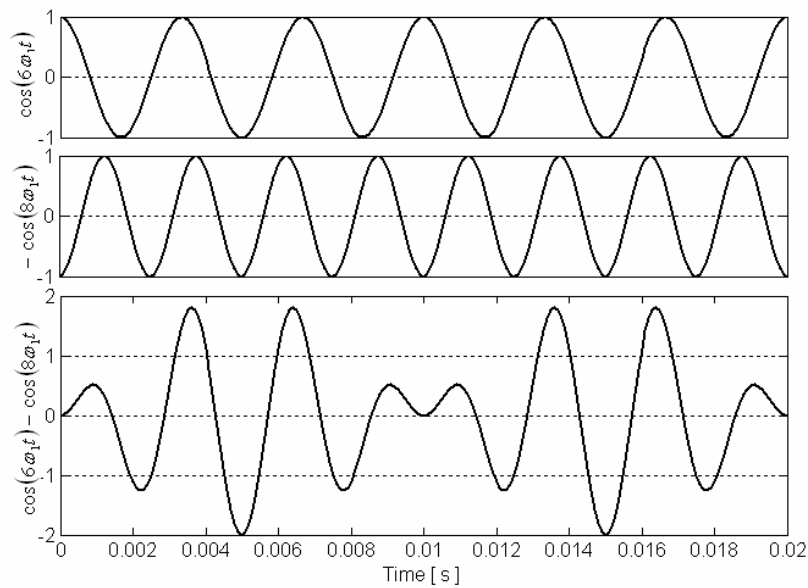


Figura 2-8. Potencias instantáneas de la fase a

En la figura 2-9 están representados las potencias instantáneas de las tres fases cuya frecuencia es $6\omega_1$, en la parte superior se muestra la potencia instantánea de la fase a , en la mitad se muestra la potencia instantánea de la fase b , y en la parte inferior se muestra la potencia instantánea de la fase c . Estas potencias son funciones sinusoidales puras, por lo tanto tienen valor medio nulo y son potencias instantáneas bidireccionales que fluyen de la red de suministro a la carga y viceversa, también es posible notar que la secuencia de rotación de estas potencias es cero.

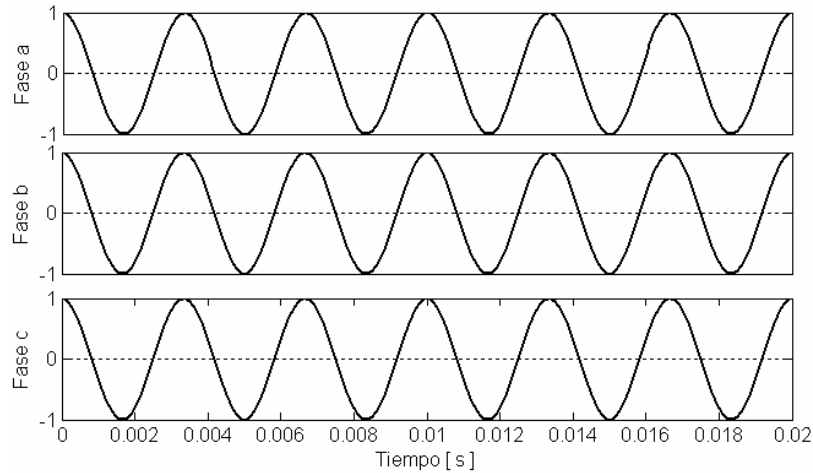


Figura 2-9. Potencia instantánea bidireccional (ineficiente) con frecuencia $6\omega_1$ y secuencia de rotación cero.

De la misma forma, en la figura 2-10 están representados las potencias instantáneas de las tres fases de frecuencia $8\omega_1$. En la parte superior está representada la potencia instantánea de la fase a , en la mitad está representada la potencia instantánea de la fase b , y en la parte inferior está representada la potencia instantánea de la fase c . Estas potencias son funciones sinusoidales puras, por lo tanto, tienen valor medio nulo y son potencias instantáneas bidireccionales que fluyen de la red de suministro a la carga y viceversa, también es posible notar que la secuencia de rotación de estas potencias es negativa ($a-c-b$).

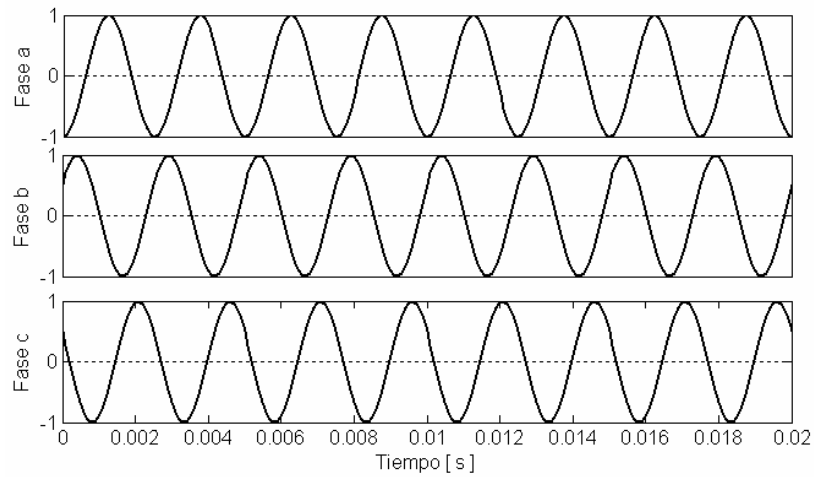


Figura 2-10. Potencia instantánea bidireccional (ineficiente) de con frecuencia $8\omega_1$ y secuencia de rotación negativa.

En la figura 2-11 se muestran las potencias instantáneas por fase y su suma (potencia instantánea trifásica). El primer gráfico es la potencia instantánea de la fase *a*. El segundo gráfico es la potencia instantánea de la fase *b*. El tercer gráfico es la potencia instantánea de la fase *c*. El cuarto gráfico es la potencia instantánea trifásica. La potencia instantánea trifásica es una función sinusoidal (ecuación (2.69)) a pesar de que las potencias instantáneas por fase no lo son.

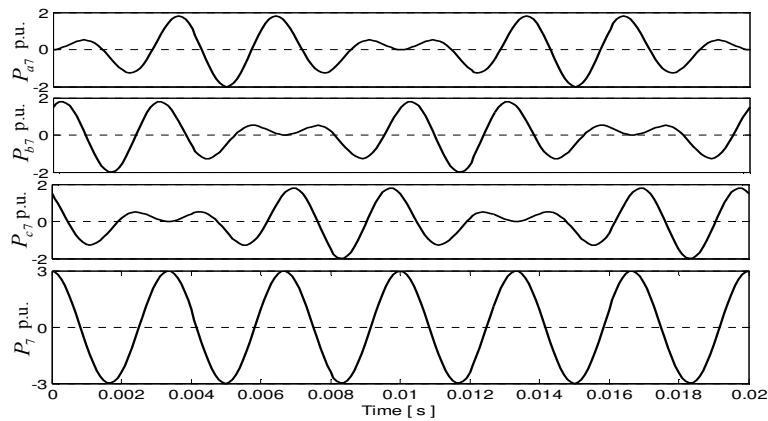


Figura 2-11. Potencias instantáneas por fase y su suma (potencia instantánea trifásica).

Puede notarse que si se considera la medida desde el punto de vista trifásico solo es posible detectar la potencia instantánea cuya secuencia de rotación es cero y frecuencia $6\omega_1$. Las potencias instantáneas de secuencia de rotación negativa y frecuencia $8\omega_1$, al sumarse de forma instantánea y ser igual a cero, no se puede detectar (similar a lo que ocurre con la potencia reactiva trifásica fundamental).

2.3.2. Cuantificación de potencia para armónicos equilibrados de corriente de secuencia negativa.

Para el análisis de esta situación se supondrá que en el sistema de la figura 1-2 solo existen componentes fundamentales simétricas de voltaje ($V_{a1}^+ = V_{b1}^+ = V_{c1}^+ = V_1^+$) y corrientes armónicas equilibradas de secuencia negativa ($I_{ah}^- = I_{bh}^- = I_{ch}^- = I_h^-$), estos armónicos tienen secuencia de rotación ($a-c-b$). Si la carga no lineal está compuesta por armónicos de corriente de secuencia negativa, el orden de los armónicos es $h=3n+2$. Con el objetivo de entender la naturaleza de la potencia producida por las componentes negativas de corriente armónica, solo se tendrá en cuenta una de ellas, así que, reemplazando $h=3n+2$ en (2.61) la potencia instantánea de cada fase producida por uno de los armónicos de secuencia negativa es:

$$\begin{aligned} p_{ah}^-(t) &= V_{a1}^+ I_{ah}^- \{ \cos [(3n+1)(\omega_1 t - \varphi_a) + \beta_{ah}] - \cos [(3n+3)(\omega_1 t - \varphi_a) + \beta_{ah}] \} \\ p_{bh}^-(t) &= V_{b1}^+ I_{bh}^- \{ \cos [(3n+1)(\omega_1 t - \varphi_b) + \beta_{bh}] - \cos [(3n+3)(\omega_1 t - \varphi_b) + \beta_{bh}] \} \\ p_{ch}^-(t) &= V_{c1}^+ I_{ch}^- \{ \cos [(3n+1)(\omega_1 t - \varphi_c) + \beta_{ch}] - \cos [(3n+3)(\omega_1 t - \varphi_c) + \beta_{ch}] \} \end{aligned} \quad (2.71)$$

La potencia de cada fase está compuesta básicamente por dos términos cosenoidales: el primero tiene una frecuencia angular de $(3n+1)\omega_1$, y el segundo tiene una frecuencia angular de $(3n+3)\omega_1$; así que, en cada fase existen dos potencias instantáneas individuales cuyo valor medio es nulo. La potencia instantánea trifásica puede obtenerse de (2.63):

$$p_h^-(t) = V_1^+ I_h^- \left[\begin{aligned} & \left\{ \cos [(3n+1)\omega_1 t - (3n+1)\varphi_a + \beta_{zh}] + \right. \\ & \left. + \cos [(3n+1)\omega_1 t - (3n+1)\varphi_b + \beta_{zh}] + \right\} + \\ & \left\{ \cos [(3n+1)\omega_1 t - (3n+1)\varphi_c + \beta_{zh}] \right\} \\ & - \left\{ \cos [(3n+3)\omega_1 t - (3n+3)\varphi_a + \beta_{zh}] + \right. \\ & \left. + \cos [(3n+3)\omega_1 t - (3n+3)\varphi_b + \beta_{zh}] + \right\} \\ & \left. + \cos [(3n+3)\omega_1 t - (3n+3)\varphi_c + \beta_{zh}] \right] \end{aligned} \quad (2.72)$$

La secuencia de rotación para el primer término agrupado entre llaves está determinada por la expresión “ $-(3n+1)\varphi_z$ ” ($-(3n+1)\varphi_a=0$, $-(3n+1)\varphi_b=-2\pi/3$, $-(3n+1)\varphi_c=-4\pi/3$), se puede inferir que la secuencia de rotación de este primer término es positiva, por lo tanto, la potencia instantánea trifásica de este primer término es nulo, es considerado ineficiente debido a que está compuesto por potencias instantáneas monofásicas de valor medio nulo.

De la misma manera, la secuencia de rotación para el segundo término agrupado entre llaves está determinada por la expresión “ $-(3n+3)\varphi_z$ ” ($-(3n+3)\varphi_a=-(3n+3)\varphi_b=-(3n+3)\varphi_c=0$), la secuencia de rotación para este término es cero, por lo tanto, su valor medio es nulo estableciéndose una potencia instantánea bidireccional (ineficiente).

Sumando los términos comunes de (2.72) y simplificando, se tiene:

$$p_h^-(t) = 3V_1^+ I_h^- \cos [(3n+3)\omega_1 t + \beta_{zh}] \quad (2.73)$$

$p_h^-(t)$ solo está formada por componentes de secuencia cero. Siguiendo la teoría de la potencia instantánea es posible la cuantificación de $S_{eN\#}$ cuando existen armónicos de corriente de secuencia negativa usando la amplitud de $p_h^-(t)$:

$$S_{eN\#} = 3V_1^+ I_h^- \quad (2.74)$$

En un sistema de potencia, los armónicos de corriente más comunes cuya secuencia de rotación es negativa son el quinto ($n=1$) y el onceavo ($n=3$). Con el fin de mostrar con claridad los efectos físicos de la potencia descrita en esta sección, la simulación del circuito de la figura 1-2, que en este caso solo demanda una corriente armónica equilibrada cuyo orden es 5, fue realizada usando Matlab/Simulink. Las condiciones establecidas para la simulación son:

- La tensión suministrada por la red contiene sólo a V_1^+ .
- La carga no lineal y equilibrada demanda solo el armónico 5 de la corriente ($I_{a5}^- = I_{b5}^- = I_{c5}^- = I_5^-$).
- No existe desfase entre la tensión y la corriente de cada fase ($\beta_5^- = 0^\circ$). Los resultados para otros valores de β_5^- son análogos.

La representación fasorial de la simulación a realizar se puede ver en la figura 2-7b. Reemplazando $n=1$ en (2.71), la potencia instantánea de cada fase $p_{z5}^-(t)$ provocada por el 5º armónico de corriente es:

$$\begin{aligned} p_{a5}^-(t) &= V_{a1}^+ I_{a5}^- \{ \cos(4\omega_1 t) - \cos(6\omega_1 t) \} \\ p_{b5}^-(t) &= V_{b1}^+ I_{b5}^- \left\{ \cos\left(4\omega_1 t - \frac{2\pi}{3}\right) - \cos(6\omega_1 t) \right\} \\ p_{c5}^-(t) &= V_{c1}^+ I_{c5}^- \left\{ \cos\left(4\omega_1 t - \frac{4\pi}{3}\right) - \cos(6\omega_1 t) \right\} \end{aligned} \quad (2.75)$$

La potencia trifásica en este caso puede ser obtenida de (2.73):

$$p_5^-(t) = -3V_1^+ I_5^- \cos(6\omega_1 t) \quad (2.76)$$

En este caso la cuantificación de $S_{eN\#}$ es:

$$S_{eN\#} = 3V_1^+ I_5^- \quad (2.77)$$

Con el fin de representar la potencia instantánea por fase, en la figura 2-12 se muestra la potencia instantánea de la fase a en el sistema p.u. La potencia instantánea de cada fase está formada por dos potencias instantáneas bidireccionales. La primera potencia instantánea tiene una frecuencia de $4\omega_1$ y es la gráfica ubicada en la parte superior de la figura 2-12. La segunda potencia instantánea tiene una frecuencia de $6\omega_1$ y es la gráfica ubicada en el medio de la figura 2-12. La potencia instantánea por fase, que es la contribución de las dos anteriores potencias instantáneas sinusoidales, es la gráfica ubicada en la parte inferior de la figura 2-12. El valor máximo $p_{z5}^-(t)$ es 2 p.u y el valor mínimo es inferior a -1 p.u.

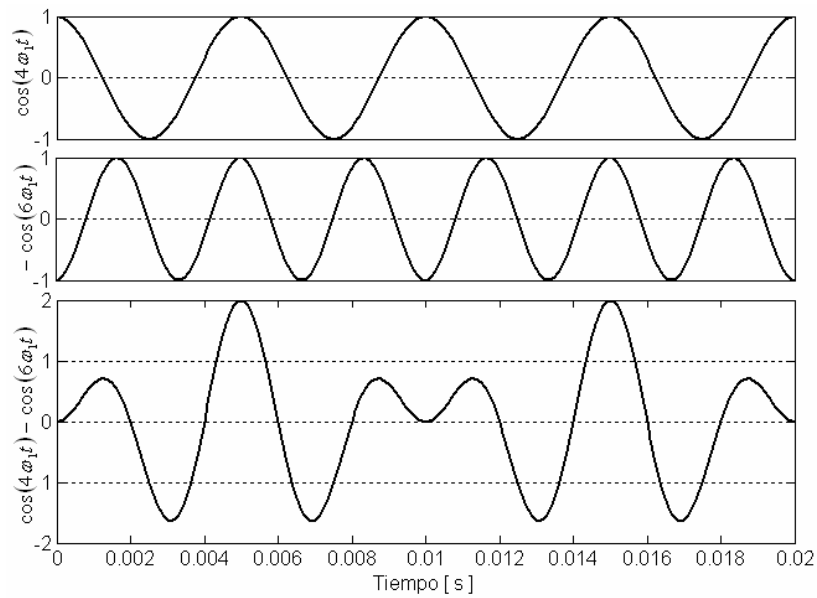


Figura 2-12. Potencias instantáneas de la fase *a*

En la figura 2-13 están representados las potencias instantáneas de las tres fases cuya frecuencia es $4\omega_1$. En la parte superior está representada la potencia instantánea de la fase *a*, en la mitad está representado la potencia instantánea de la fase *b*, y en la parte inferior está representada la potencia instantánea de la fase *c*. Estas potencias instantáneas son funciones sinusoidales puras, por lo tanto tienen valor medio nulo y representan flujos bidireccionales que fluyen de la red de suministro a la carga y viceversa, también es posible notar que la secuencia de rotación de estas potencias es positiva (*a-b-c*).

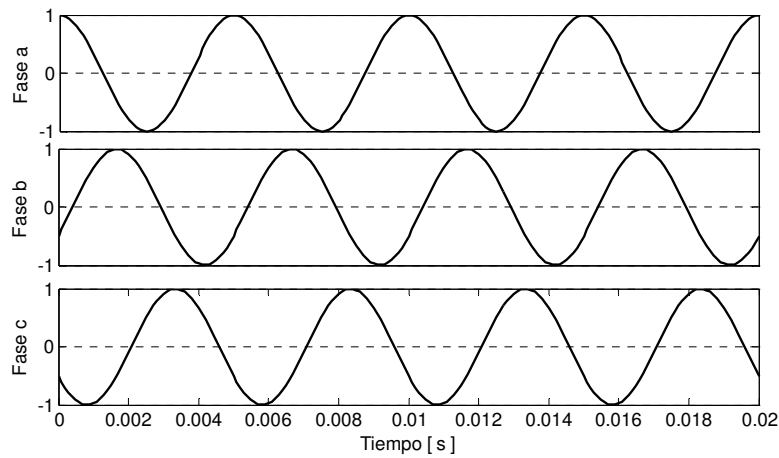


Figura 2-13. Potencias instantáneas bidireccionales (ineficientes) con frecuencia $4\omega_1$ y secuencia de rotación positiva

De la misma forma, en la figura 2-14 están representadas las potencias instantáneas de las tres fases cuya frecuencia $6\omega_1$, en la parte superior está representada la potencia instantánea de la fase *a*, en la mitad está representada la potencia instantánea de la fase *b*, y en la parte inferior está representada la potencia instantánea de la fase *c*. Estas potencias instantáneas son funciones sinusoidales puras, por lo tanto, tienen valor medio nulo y representan flujos bidireccionales (ineficientes) que fluyen de la red de suministro a la carga y viceversa, también es posible notar que la secuencia de rotación es cero.

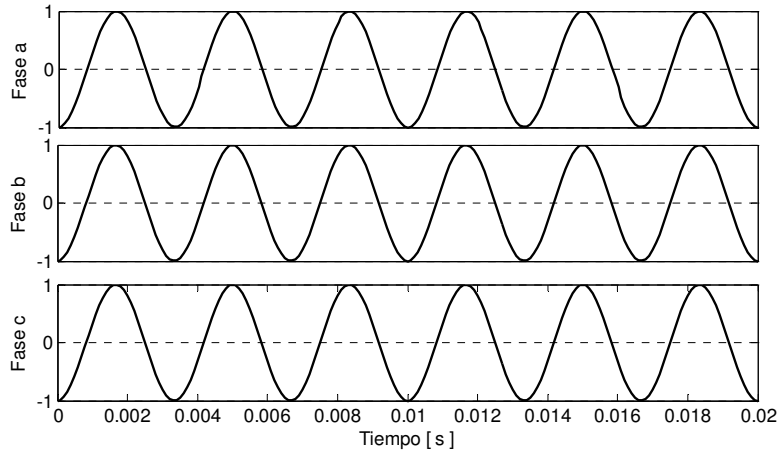


Figura 2-14. Potencias instantáneas bidireccionales (ineficiente) con frecuencia $6\omega_1$ y secuencia de rotación cero.

En la figura 2-15 se muestran las potencias instantáneas totales por fase y su suma (potencia instantánea trifásica). El primer gráfico es la potencia instantánea total de la fase *a*. El segundo gráfico es la potencia instantánea de la fase *b*. El tercer gráfico es la potencia instantánea de la fase *c*. El cuarto gráfico es la potencia instantánea trifásica. La potencia instantánea trifásica es una función sinusoidal (2.73) a pesar de que las potencias instantáneas por fase no lo son.

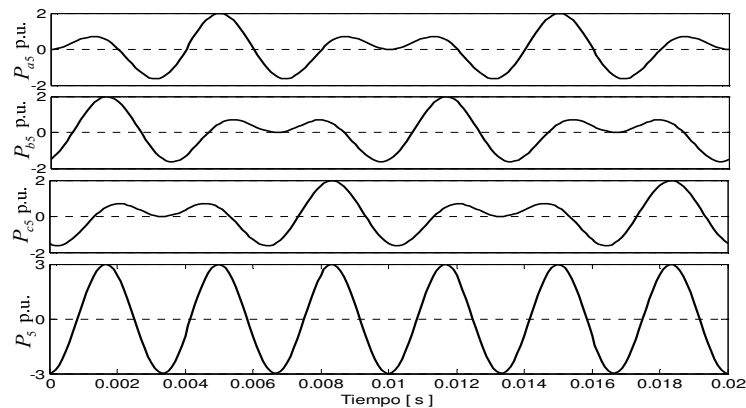


Figura 2-15. Potencias instantáneas por fase y su suma (potencia instantánea trifásica).

Puede notarse que si se considera la medida desde el punto de vista trifásico solo es posible detectar la potencia instantánea cuya secuencia de rotación es cero y frecuencia $6\omega_1$. Las potencias instantáneas de secuencia de rotación positiva y frecuencia $4\omega_1$, al sumarse de forma instantánea y ser igual a cero, no se puede detectar.

2.3.3. Cuantificación de potencia para armónicos equilibrados de corriente de secuencia cero.

Para el análisis de esta situación se supondrá que en el sistema de la figura 1-2 solo existen componentes fundamentales simétricas de voltaje ($V_{a1}^+ = V_{b1}^+ = V_{c1}^+ = V_1^+$) y corrientes de carga armónicas equilibradas de secuencia cero ($I_{ah}^0 = I_{bh}^0 = I_{ch}^0 = I_h^0$). Si la carga no lineal está compuesta por armónicos de corriente de secuencia cero, el orden de los armónicos es $h=3n+3$. Con el objetivo de entender la naturaleza de la potencia producida por las componentes negativas de corriente armónica, solo se tendrá en cuenta una de ellas, así que, reemplazando $h=3n+3$ en (2.61) la potencia instantánea de cada fase producida por uno de los armónicos de secuencia negativa es:

$$\begin{aligned} p_{ah}^0(t) &= V_{a1}^+ I_{ah}^0 \{ \cos[(3n+2)(\omega_1 t - \varphi_a) + \beta_{ah}] - \cos[(3n+4)(\omega_1 t - \varphi_a) + \beta_{ah}] \} \\ p_{bh}^0(t) &= V_{b1}^+ I_{bh}^0 \{ \cos[(3n+2)(\omega_1 t - \varphi_b) + \beta_{bh}] - \cos[(3n+4)(\omega_1 t - \varphi_b) + \beta_{bh}] \} \\ p_{ch}^0(t) &= V_{c1}^+ I_{ch}^0 \{ \cos[(3n+2)(\omega_1 t - \varphi_c) + \beta_{ch}] - \cos[(3n+4)(\omega_1 t - \varphi_c) + \beta_{ch}] \} \end{aligned} \quad (2.78)$$

La potencia de cada fase está compuesta básicamente por dos términos cosenoidales: el primero tiene una frecuencia angular de $(3n+2)\omega_1$, y el segundo tiene una frecuencia angular de $(3n+4)\omega_1$. Así que, en cada fase existen dos potencias instantáneas cuyo valor medio es nulo. La potencia instantánea trifásica puede obtenerse de (2.63):

$$p_h^0(t) = V_1^+ I_h^0 \left[\begin{aligned} & \left\{ \begin{aligned} & \cos[(3n+2)\omega_1 t - (3n+2)\varphi_a + \beta_{zh}] + \\ & + \cos[(3n+2)\omega_1 t - (3n+2)\varphi_b + \beta_{zh}] + \\ & \cos[(3n+2)\omega_1 t - (3n+2)\varphi_c + \beta_{zh}] \end{aligned} \right\} + \\ & - \left\{ \begin{aligned} & \cos[(3n+4)\omega_1 t - (3n+4)\varphi_a + \beta_{zh}] + \\ & + \cos[(3n+4)\omega_1 t - (3n+4)\varphi_b + \beta_{zh}] + \\ & + \cos[(3n+4)\omega_1 t - (3n+4)\varphi_c + \beta_{zh}] \end{aligned} \right\} \end{aligned} \right] \quad (2.79)$$

La secuencia de rotación para el primer término agrupado entre llaves de $p_h^0(t)$ está determinada por la expresión “ $-(3n+2)\varphi_z$ ” ($-(3n+2)\varphi_a=0$, $-(3n+2)\varphi_b=-4\pi/3$, $-(3n+2)\varphi_c=-2\pi/3$), se puede inferir que la secuencia de rotación de este primer término es negativa, por lo tanto, la potencia instantánea trifásica de este primer término es nulo, es considerado ineficiente debido a que está compuesto por potencias instantáneas monofásicas de valor medio nulo.

De la misma manera, la secuencia de rotación para el segundo término agrupado entre llaves está determinada por la expresión “ $-(3n+4)\varphi_z$ ” ($-(3n+4)\varphi_a=0$, $-(3n+4)\varphi_b=-2\pi/3$, $-(3n+4)\varphi_c=-4\pi/3$), la secuencia de rotación para este término es positiva, por lo tanto, la

potencia instantánea trifásica de este segundo término es nula, es considerada ineficiente debido a que está compuesta por potencias instantáneas monofásicas cuyo valor medio es nulo.

Sumando los términos comunes de (2.79) y simplificando, se tiene:

$$p_h^0(t) = 0 \quad (2.80)$$

Debido a que $p_h^0(t)$ es cero, la cuantificación de $S_{eN\#}$ puede ser realizada si se suman los términos de cada fase que multiplican a los términos entre llaves de (2.78):

$$S_{eN\#} = V_{a1}^+ I_{ah}^0 + V_{b1}^+ I_{bh}^0 + V_{c1}^+ I_{ch}^0 = 3V_1^+ I_h^0 \quad (2.81)$$

En un sistema de potencia, los armónicos de corriente más comunes cuya secuencia de rotación es cero son el tercero ($n=0$) y el noveno ($n=2$). Con el fin de mostrar con claridad los efectos físicos de la potencia descrita en esta sección, la simulación del circuito de la figura 1-2 que en este caso solo demanda una corriente armónica equilibrada cuyo orden es 3 fue realizada usando Matlab/Simulink. Las condiciones establecidas para la simulación son:

- La tensión suministrada por la red contiene sólo a V_1^+ .
- La carga está compuesta por el armónico 3 de la corriente equilibrado ($I_{a3}^0 = I_{b3}^0 = I_{c3}^0 = I_3^0$).
- No existe desfase entre la tensión y la corriente de cada fase ($\beta_3^0 = 0^\circ$)., Los resultados para otros valores de β_3^0 son análogos.

La representación fasorial de la simulación a realizar se puede ver en la figura 2-7c. Reemplazando $n=0$ en (2.78), la potencia instantánea de cada fase producida por el 3º armónico de corriente es:

$$\begin{aligned} p_{a3}^0(t) &= V_{a1}^+ I_{a3}^0 \{ \cos(2\omega_1 t) - \cos(4\omega_1 t) \} \\ p_{b3}^0(t) &= V_{b1}^+ I_{b3}^0 \left\{ \cos\left(2\omega_1 t - 4\frac{\pi}{3}\right) - \cos\left(4\omega_1 t - 2\frac{\pi}{3}\right) \right\} \\ p_{c3}^0(t) &= V_{c1}^+ I_{c3}^0 \left\{ \cos\left(2\omega_1 t - 2\frac{\pi}{3}\right) - \cos\left(4\omega_1 t - 4\frac{\pi}{3}\right) \right\} \end{aligned} \quad (2.82)$$

La potencia trifásica en este caso puede ser obtenida de (2.80):

$$p_3^0(t) = 0 \quad (2.83)$$

En este caso la cuantificación de $S_{eN\#}$ es:

$$S_{eN\#} = 3V_1^+ I_3^0 \quad (2.84)$$

Con el fin de representar la potencia instantánea por fase, en la figura 2-16 se muestra la potencia instantánea de la fase a en el sistema p.u. La potencia instantánea de cada fase está formada por dos potencias instantáneas. La primera potencia instantánea tiene una frecuencia de $2\omega_1$ y es la gráfica ubicada en la parte superior de la figura 2-16. La segunda potencia instantánea tiene una frecuencia de $4\omega_1$ y es la gráfica ubicada en el medio de la figura 2-16, y la

potencia instantánea por fase, que es la contribución de las dos anteriores potencias, es la gráfica ubicada en la parte inferior de la figura 2-16. El valor mínimo $p_{25}^-(t)$ 2 p.u y el valor máximo es superior a 1 p.u.

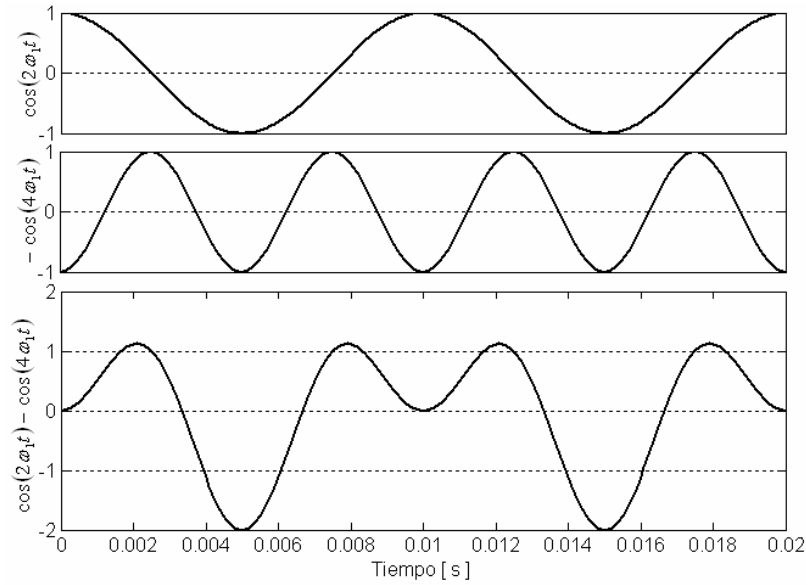


Figura 2-16. Potencias instantáneas de la fase a

En la figura 2-17 están representadas las potencias instantáneas de las tres fases cuya frecuencia es $2\omega_1$, en la parte superior está representada la potencia instantánea de la fase a , en la mitad está representada la potencia instantánea de la fase b , y en la parte inferior está representada la potencia instantánea de la fase c . Estas potencias instantáneas son funciones sinusoidales puras, por lo tanto tienen valor medio nulo y fluyen de la red de suministro a la carga y viceversa, también es posible notar que la secuencia de rotación es negativa ($a-c-b$).

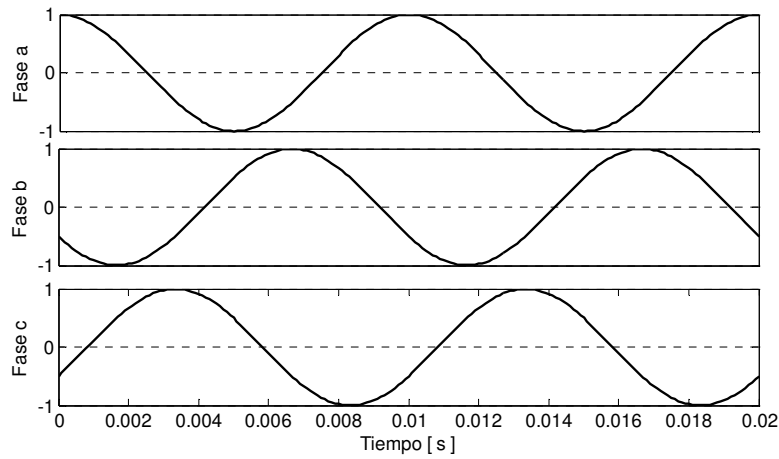


Figura 2-17. Potencias instantáneas bidireccionales (ineficientes) con frecuencia $2\omega_1$ y secuencia de rotación negativa.

De la misma forma, en la figura 2-18 están representadas las potencias instantáneas de las tres fases cuya frecuencia $4\omega_1$. En la parte superior se muestra la potencia instantánea de la fase *a*, en la mitad se muestra la potencia instantánea de la fase *b*, y en la parte inferior se muestra la potencia instantánea de la fase *c*. Estas potencias instantáneas son funciones sinusoidales puras, por lo tanto, tienen valor medio nulo y representan flujos bidireccionales que fluyen de la red de suministro a la carga y viceversa, también es posible notar que la secuencia de rotación es positiva (*a-b-c*).

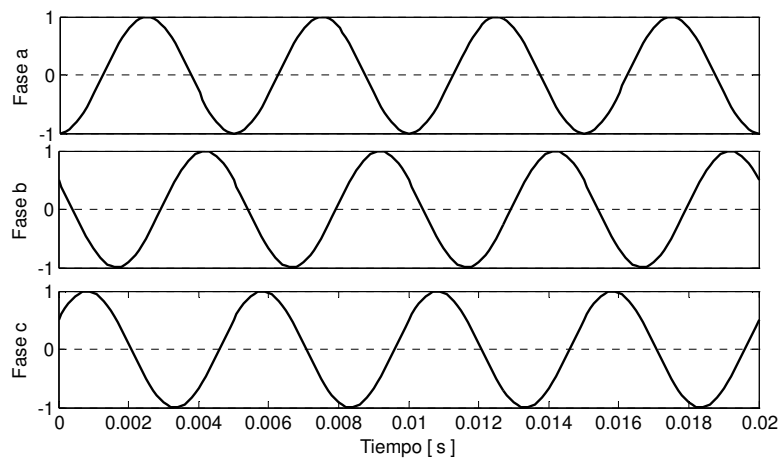


Figura 2-18. Potencias instantáneas bidireccionales (ineficientes) con frecuencia $4\omega_1$ y secuencia de rotación positiva.

En la figura 2-19 se muestran las potencias instantáneas totales por fase y su suma (potencia instantánea trifásica). El primer gráfico es la potencia instantánea total de la fase *a*. El segundo gráfico es la potencia instantánea de la fase *b*. El tercer gráfico es la potencia instantánea de la

fase c. La potencia instantánea trifásica es cero (2.83) indicando así que no existe intercambio de potencia entre la fuente y la carga.

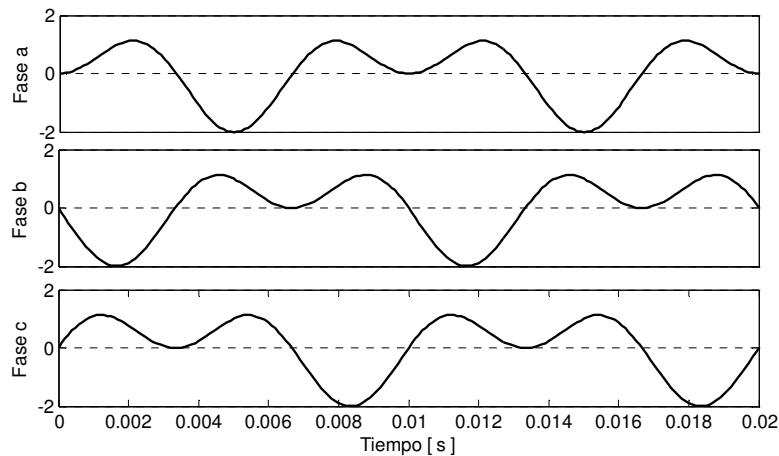


Figura 2-19. Potencias instantáneas por fase y su suma (potencia instantánea trifásica).

Puede notarse que si se considera la medida desde el punto de vista trifásico no es posible detectar ningún tipo potencia instantánea ya que las potencias instantáneas de frecuencias $2\omega_1$ y de $4\omega_1$ no aparecen en la medida pero sin embargo existen en cada fase y provocan pérdidas en líneas y cargas.

2.3.4. Cuantificación de potencia para sistemas con cargas no lineales y tensiones no sinusoidales.

En esta sección se encontrará una expresión para la potencia instantánea que contempla cargas no lineales y tensiones no sinusoidales. Para lograrlo, se requiere usar expresiones de voltaje y corriente instantáneos de frecuencias y fases diferentes. El desarrollo de las expresiones de potencia instantánea en términos sinusoidales puros tiende a volverse más extenso a medida que las tensiones y corrientes instantáneas son diferentes. En los pasos intermedios de la resolución aparecen expresiones bastante complejas, en las que, para simplificar la deducción final, se aprovecharan los resultados obtenidos por [43] y los resultados obtenidos en la sección 2.3.3. En esta sección, se obtendrá una expresión de potencia instantánea en términos de componentes sinusoidales puras para un sistema trifásico a 4 hilos que contiene armónicos de corriente tensión.

Para un sistema trifásico con armónicos de corriente y de tensión, el voltaje instantáneo puede ser escrito como sigue:

$$v_{zm}(t) = \sqrt{2} \sum_{m=1}^{\infty} V_{zm} \text{sen}(m(\omega_1 t - \varphi_z) + \alpha_{zm}) \quad (2.85)$$

El subíndice m , en este caso indica el orden del armónico de tensión y es usado para diferenciar los armónicos de tensión con los armónicos de corriente.

De la misma manera, la corriente instantánea por fase cuando existe una carga no lineal es:

$$i_{zn}(t) = \sqrt{2} \sum_{n=1}^{\infty} I_{zn} \text{sen}(n(\omega_1 t - \varphi_z) + \beta_{zn}) \quad (2.86)$$

El subíndice n indica el orden de los armónicos de corriente. La expresión de la potencia instantánea por fase ($p_{zmn}(t)$) cuando existen componentes armónicas de tensión y corriente corresponde al producto de los valores de tensión y corriente instantáneos:

$$p_{zmn}(t) = v_{zm}(t) i_{zn}(t) = \left\{ \begin{array}{l} \sqrt{2} \sum_{m=1}^{\infty} V_{zm} \text{sen}(m(\omega_1 t - \varphi_z) + \alpha_{zm}) \times \\ \times \sqrt{2} \sum_{n=1}^{\infty} I_{zn} \text{sen}(n(\omega_1 t - \varphi_z) + \beta_{zn}) \end{array} \right\} \quad (2.87)$$

Cada uno de los sumandos que aparecen en (2.87) está formado por un término de la tensión (m) y uno de la corriente (n), correspondiendo a una potencia instantánea cuya expresión es como sigue:

$$p_{zmn}(t) = 2V_{zm} \text{sen}(m(\omega_1 t - \varphi_z) + \alpha_{zm}) I_{zn} \text{sen}(n(\omega_1 t - \varphi_z) + \beta_{zn}) \quad (2.88)$$

A partir de los resultados obtenidos en los casos anteriores y usando el mismo procedimiento de la sección 2.3.3, es posible obtener la siguiente expresión:

$$p_{zmn}(t) = V_{zm} I_{zn} \left\{ \begin{array}{l} \cos[(n-m)(\omega_1 t - \varphi_z) + \beta_{zn} - \alpha_{zm}] + \\ - \cos[(n+m)(\omega_1 t - \varphi_z) + \beta_{zn} + \alpha_{zm}] \end{array} \right\} \quad (2.89)$$

La potencia instantánea trifásica es la contribución de cada una de las fases:

$$p_{mn}(t) = \sum_{z=a,b,c} V_{zm} I_{zn} \left\{ \begin{array}{l} \cos[(n-m)(\omega_1 t - \varphi_z) + \beta_{zn} - \alpha_{zm}] + \\ - \cos[(n+m)(\omega_1 t - \varphi_z) + \beta_{zn} + \alpha_{zm}] \end{array} \right\} \quad (2.90)$$

Esta expresión de potencia instantánea concuerda con todas las expresiones de potencia instantáneas analizadas previamente cuando se evalúan los valores de m y n . Observe que esta expresión de potencia está compuesta por dos términos cosenoidales puros de frecuencias angulares $(n-m)\omega_1$ y $(n+m)\omega_1$, en los que la secuencia de rotación tiene que ver con los términos $-(n-m)\varphi_z$ y $-(n+m)\varphi_z$. La expresión anterior verifica el estudio realizado en la sección 5 de [43] para la fase b .

La potencia provocada por cualquier componente de la tensión y de la corriente puede cuantificarse de la siguiente manera:

$$S_{e\#} = 3V_m I_n \quad (2.91)$$

Con el objetivo de observar las potencias instantáneas de un sistema trifásico a 4 hilos, se simulará usando Matlab/Simulink la potencia instantánea producida por el quinto armónico de voltaje y el séptimo armónico de corriente. Las condiciones establecidas para la simulación son:

- La tensión de alimentación es simétrica y está compuesta por el 5° armónico ($n=5$) ($V_{a5}^- = V_{b5}^- = V_{c5}^- = V_5^-$).
- La carga es equilibrada y demanda el armónico 7° de corriente ($I_{a7}^+ = I_{b7}^+ = I_{c7}^+ = I_7^+$).
- No existe desfase entre la tensión y la corriente de cada fase ($\beta_5 = \alpha_7 = 0^\circ$).

Aplicando las anteriores condiciones en (2.89), la expresión de potencia instantánea de cada fase es:

$$\begin{aligned} p_{a57}(t) &= V_5 I_7 \{ \cos(2\omega_1 t) - \cos(12\omega_1 t) \} \\ p_{b57}(t) &= V_5 I_7 \left\{ \cos\left(2\omega_1 t - \frac{4\pi}{3}\right) - \cos(12\omega_1 t) \right\} \\ p_{c57}(t) &= V_5 I_7 \left\{ \cos\left(2\omega_1 t - \frac{2\pi}{3}\right) - \cos(12\omega_1 t) \right\} \end{aligned} \quad (2.92)$$

De la expresión (2.92) es posible notar que la potencia instantánea de cada fase, está formada por dos términos cosenoidales. El primer término cosenoidal de cada fase tiene una frecuencia de $2\omega_1$ y una secuencia de rotación negativa. El segundo término cosenoidal de cada fase tiene una frecuencia de $12\omega_1$ y una frecuencia de rotación igual a cero. La potencia trifásica se obtiene sumando las potencias instantáneas por fase de (2.92):

$$p_{57}(t) = 3V_5 I_7 \cos(12\omega_1 t) \quad (2.93)$$

En este caso, la cuantificación de la potencia puede realizarse de la siguiente manera:

$$S_{eN\#} = 3V_5 I_7 \quad (2.94)$$

Con el fin de representar la potencia instantánea por fase, en la figura 2-20 se muestra la potencia instantánea de la fase a en el sistema p.u. La potencia instantánea de cada fase está formada por dos potencias instantáneas bidireccionales. El primer término tiene una frecuencia de $2\omega_1$ y es la gráfica ubicada en la parte superior de la figura 2-20. El segundo término tiene una frecuencia de $12\omega_1$ y es la gráfica ubicada en el medio de la figura 2-20. La potencia instantánea por fase, que es la contribución de las dos potencias instantáneas sinusoidales anteriores, es la gráfica ubicada en la parte inferior de la figura 2-20. El valor máximo $p_{57}(t)$ es superior a 1 p.u y el valor mínimo es -2 p.u.

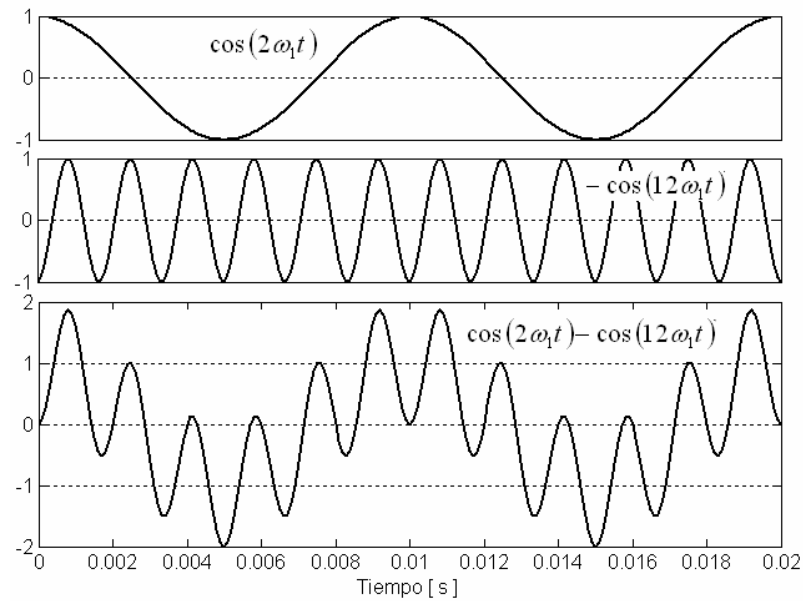


Figura 2-20. Potencia instantánea de la fase a

En la figura 2-21 se muestran las potencias instantáneas por fase (fases a - b - c de arriba a abajo) y su suma (potencia instantánea trifásica en el gráfico inferior). La potencia instantánea trifásica es una función sinusoidal a pesar de que las potencias instantáneas por fase no lo son.

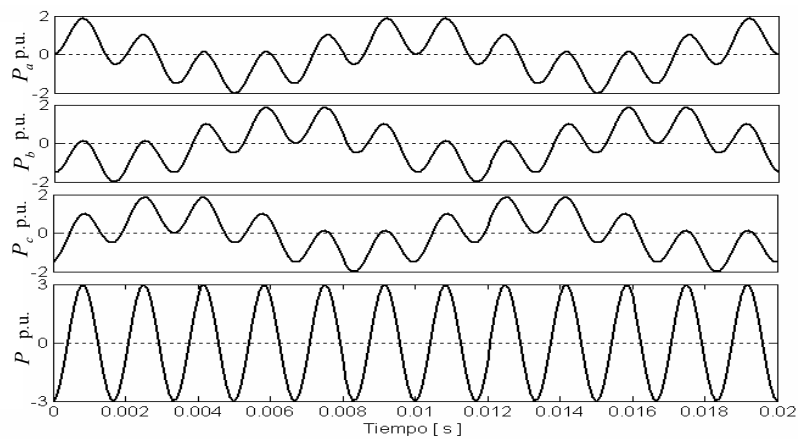


Figura 2-21. Potencias instantáneas por fase y su suma (Potencia instantánea trifásica).

Puede notarse que si se considera la medida desde el punto de vista trifásico solo es posible detectar la potencia instantánea cuya secuencia de rotación es cero y frecuencia $12\omega_1$, la potencia instantánea de secuencia de rotación negativa y frecuencia $2\omega_1$, al sumarse de forma instantánea y ser igual a cero, no se puede detectar.

2.4. Conclusiones

Se ha desarrollado la teoría de la potencia instantánea como extensión de los desarrollos previos existentes y como alternativa para cuantificar correctamente los fenómenos de potencia de los sistemas eléctricos. Se ha demostrado mediante el estudio de los flujos de potencia instantánea que la única potencia que representa una transferencia eficiente de energía desde la red de suministro hacia la carga es P_1^+ .

El resto de potencias instantáneas presentes en el sistema eléctrico son consideradas ineficientes ya que son potencias instantáneas bidireccionales o nulas que circulan entre la red de suministro y la carga. Estas potencias instantáneas no representan un intercambio efectivo de energía, provocando pérdidas y efectos nocivos en los sistemas eléctricos. Debido a que a la teoría de la potencia instantánea propuesta tiene significado físico (se calcula a partir de las componentes de tensiones y corrientes en el sistema), esta teoría puede ser usada simultáneamente para cuantificar la potencia eléctrica, evaluar la calidad de la energía, compensar ineficiencias de potencia, e inclusive determinar fuentes de distorsión armónica.

Se ha deducido una expresión de potencia instantánea (ecuación (2.89)) válida para sistemas eléctricos con tensiones asimétricas no fundamentales y con cargas no lineales desequilibradas. Con ayuda de esta expresión se puede cuantificar la potencia de los sistemas eléctricos. La cuantificación de potencia mediante el uso de la teoría de la potencia instantánea coincide con la cuantificación de potencia realizada mediante la propuesta de modificación de la IEEE Std. 1459-2010 expuesta en la sección 1.2.3.4.

CAPITULO 3

3. Pérdidas y efectos en los sistemas eléctricos provocados por la conexión de cargas ineficientes.

En este capítulo se resumirán las pérdidas y los efectos en los sistemas eléctricos provocados por la conexión de cargas ineficientes. Los elementos del sistema eléctrico que se analizarán son las líneas o conductores de alimentación, transformadores de distribución, y máquinas rotativas. Para el análisis, se tendrán en cuenta los resultados y los estudios publicados de la bibliografía más relevante. Se vinculará cada pérdida y efecto con las magnitudes de potencia propuestas en la sección 1.2.3.4 (P_1^+ , Q_1^+ , $S_{U1\#}$, y $S_{eN\#}$).

La demanda de cada magnitud de potencia de la IEEE Std. 1459-2010 tiene asociada una corriente respectivamente. La demanda de P_1^+ está asociada con la circulación de I_1^{+a} por el sistema eléctrico. La demanda de Q_1^+ está asociada con la circulación de I_1^{+r} por el sistema eléctrico. La demanda de $S_{U1\#}$ está asociada con la circulación de I_1^- e I_1^0 por el sistema eléctrico. La demanda de $S_{eN\#}$ está asociada con la circulación de I_H por el sistema eléctrico. I_1^{+r} , I_1^- , I_1^0 , e I_H provocan pérdidas y efectos nocivos en el sistema eléctrico de potencia, I_1^{+a} representa el flujo de energía eficiente entre la red de suministro y las cargas, aunque también provoca pérdidas inevitables en las resistencias de las líneas.

En la sección 3.1 se resumirán las pérdidas en conductores y otros efectos provocados por la conexión de cargas no ideales. En la sección 3.2 se resumirán las pérdidas transformadores provocados por la conexión de cargas no ideales. En la sección 3.3 se resumirán las pérdidas en máquinas rotativas y otros efectos provocados por la conexión de cargas no ideales.

3.1. Pérdidas en conductores y otros efectos provocados por la conexión de cargas ineficientes.

Las corrientes que demanda la carga son transportadas desde la fuente a través de los conductores de alimentación. Es por esto que las potencias P_1^+ , Q_1^+ , $S_{U1\#}$, y $S_{eN\#}$ inciden directamente sobre las pérdidas de los conductores de alimentación, entre otros efectos. En la sección 3.1.1 se analizarán las pérdidas de los conductores de alimentación y en la sección 3.1.2 se analizarán los efectos de las ineficiencias de potencia en los conductores de alimentación.

3.1.1. Pérdidas de potencia en redes de distribución o conductores de alimentación.

La pérdida de potencia que se produce en los conductores de las redes de distribución de la energía eléctrica es un factor de suma importancia para evaluar la eficiencia de los sistemas eléctricos, ya que el aumento de cualquier potencia eficiente o ineficiente de la carga, provoca el aumento de la pérdida de potencia en los conductores de alimentación. La misma IEEE Std. 1459-2010 basa el cálculo de la corriente efectiva (I_e) en las pérdidas de potencia de los conductores de alimentación.

El modelo mostrado en la figura 3-1 es comúnmente utilizado para calcular las pérdidas de potencia en los conductores de alimentación [26].

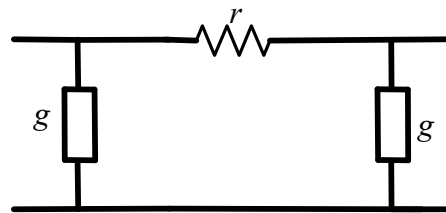


Figura 3-1. Modelo utilizado para modelar las pérdidas de los conductores de alimentación.

donde:

r : es la resistencia del conductor.

g : es la conductancia del conductor.

La resistencia r sirve para modelar las pérdidas de potencia provocadas por las corrientes que demanda la carga. La conductancia g sirve para modelar las pérdidas provocadas cuando se energizan con tensión los conductores de alimentación.

Para relacionar las pérdidas de potencia en los conductores de alimentación y provocadas por las corrientes de la carga se utilizará el circuito simplificado de la figura 3-2 por el cual circula la corriente cuyo valor rms es I_{carga} [44]-[46].



Figura 3-2. Modelo del conductor eléctrico en sistemas de distribución para el cálculo de pérdidas de potencia provocadas por la conexión de la carga.

Capítulo 3. Pérdidas y efectos en los sistemas eléctricos provocados por la conexión de cargas ineficientes.

Con el modelo de la figura 3-2 se pueden obtener las pérdidas de potencia provocadas cuando se conecta la carga. Su pérdida de potencia (ΔP_{line}), se presenta debido a que por el conductor circula la corriente I_{carga} y de que la resistencia del conductor (r) se opone al paso de la corriente:

$$\Delta P_{line} = I_{carga}^2 r \quad (3.1)$$

ΔP_{line} es también llamado pérdidas ohmicas o pérdidas en el cobre. En la expresión (3.1) se puede ver que ΔP_{line} es directamente proporcional a la resistencia del conductor y directamente proporcional al cuadrado de la corriente, por lo que para minimizar ΔP_{line} hay que actuar sobre estos dos factores:

- Reducir la resistencia del conductor de alimentación aumentando la sección del conductor. Esto en muchas ocasiones no es técnicamente posible o simplemente eleva demasiado los costos de instalación. Para aumentar la sección del conductor se debe de realizar un estudio técnico-económico y encontrar así el conductor adecuado. Formas de realizar el estudio técnico económico son propuestas por [47] y [48].
- Reducir I_{carga} a su valor mínimo que permita transferir la potencia útil demandada por la carga. I_{carga} depende de las características de la carga, a medida que la carga demanda más potencia o a medida que se incrementan las potencias ineficientes de carga, I_{carga} se incrementa. Debido a su factor cuadrático, reducir I_{carga} es la mejor forma de minimizar ΔP_{line} .

En condiciones ideales de funcionamiento del sistema eléctrico, este sólo debe suministrar a la carga P_1^+ . Esto puede ser logrado cuando la carga es equilibrada, lineal, netamente resistiva ($R_a=R_b=R_c$), y está alimentada mediante un sistema de tensiones simétricas fundamental de secuencia positiva (V_1^+), tal como se muestra en la figura 3-3. En el análisis se considerará un sistema trifásico a 4 hilos con resistencias a frecuencia fundamental en los conductores de las fases iguales (r_{line1}), e igual valor para la resistencia del conductor neutro. El punto n corresponde al punto común de la conexión “Y” de las resistencias de la carga. El punto N corresponde al punto común de la conexión “Y” de la fuente de alimentación.

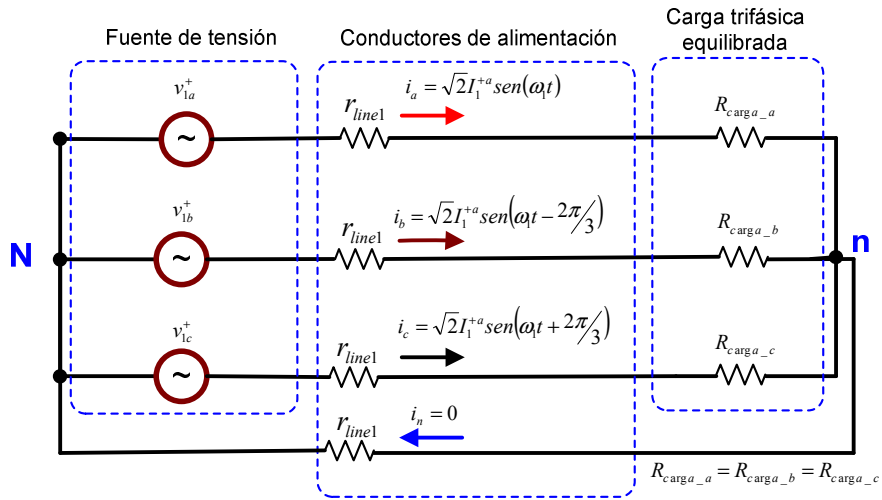


Figura 3-3. Sistema eléctrico ideal (sin demanda de potencia ineficiente).

En este caso ideal, ΔP_{line} se debe a la circulación de corriente activa fundamental de secuencia positiva (I_1^{+a}) por los conductores de las fases. I_1^{+a} se encuentra en fase con la tensión fundamental de secuencia positiva (V_1^{+a}) y la carga sólo demanda P_1^+ . En el punto n la suma instantánea de las corrientes de las fases es cero, por lo que la corriente que circula por el conductor neutro es nula y por lo tanto en este conductor no existe ni caída de tensión ($\Delta V_{Nn}=0$), ni pérdidas de potencia. El término $\Delta P_{P_1^+}$ se utilizará para denotar la pérdida de potencia provocada en los conductores de las fases debido a la demanda de P_1^+ . $\Delta P_{P_1^+}$ es el valor de pérdidas mínimas en las líneas para una determinada carga. En este caso ΔP_{line} coincide con $\Delta P_{P_1^+}$ y está dada por:

$$\Delta P_{line} = \Delta P_{P_1^+} = 3 \cdot (I_1^{+a})^2 r_{line1} \quad (3.2)$$

Para otros tipos de carga ΔP_{line} se incrementa a medida que la carga demanda más potencia aparente. Las potencias ineficientes incrementan el valor de ΔP_{line} son:

- La potencia reactiva fundamental de secuencia positiva (Q_1^+): se debe a que en los sistemas eléctricos, la corriente fundamental de secuencia positiva (I_1^+) no se encuentra en fase con la tensión fundamental de secuencia positiva (V_1^+). I_1^+ se divide en I_1^{+a} y en la corriente reactiva fundamental de secuencia positiva (I_1^{+r}). I_1^{+r} está en cuadratura con respecto a V_1^+ . I_1^{+r} se origina debido a que en los sistemas eléctricos existen cargas inductivas o capacitivas. La circulación de I_1^{+r} por los conductores de alimentación provoca pérdidas de potencia.

Capítulo 3. Pérdidas y efectos en los sistemas eléctricos provocados por la conexión de cargas ineficientes.

- La potencia aparente fundamental de desequilibrio ($S_{U1\#}$): cuantifica el desequilibrio de los sistemas eléctricos, se debe a que en los sistemas eléctricos existen tensiones fundamentales asimétricas (V_1^- y V_1^0) y existen corrientes fundamentales desequilibradas (I_1^- e I_1^0). La circulación de I_1^- e I_1^0 por los conductores de alimentación provocan pérdidas de potencia.
- La potencia aparente no fundamental ($S_{eN\#}$): cuantifica la distorsión de los sistemas eléctricos, se debe a que en los sistemas eléctricos existen tensiones y corrientes armónicas (V_H e I_H). La circulación de I_H por los conductores de alimentación provoca pérdidas de potencia.

La demanda de las diferentes potencias en la carga origina pérdidas de potencias en los conductores de alimentación.

- Las pérdidas de potencia en los conductores de alimentación está compuesta por: las pérdidas de potencia debido a la demanda de P_1^+ ($\Delta P_{P_1^+}$).
- Las pérdidas de potencia debido a la demanda de Q_1^+ ($\Delta P_{Q_1^+}$).
- Las pérdidas de potencia debido a la demanda de $S_{U1\#}$ ($\Delta P_{S_{U1\#}}$).
- Las pérdidas de potencia debido a la demanda de $S_{eN\#}$ ($\Delta P_{S_{eN\#}}$).

ΔP_{line} se puede escribir como sigue:

$$\Delta P_{line} = \Delta P_{P_1^+} + \Delta P_{Q_1^+} + \Delta P_{S_{U1\#}} + \Delta P_{S_{eN\#}} \quad (3.3)$$

En las siguientes secciones se analizará como Q_1^+ , $S_{U1\#}$, y $S_{eN\#}$ influyen en el incremento de las pérdidas de potencia en los conductores de alimentación.

3.1.1.1. Sistema trifásico a 4 hilos con voltajes simétricos fundamentales y con carga reactiva, lineal y equilibrada.

En este caso se considerará el sistema eléctrico de la figura 3-4, el cual es un sistema trifásico equilibrado cuyos voltajes son fundamentales y simétricos (V_1^+) y cuyas corrientes son fundamentales y equilibradas (I_1^+). La carga por fase está compuesta por una resistencia en paralelo con una inductancia. La carga resistiva equilibrada ($R_a=R_b=R_c$) demanda la corriente activa fundamental de secuencia positiva cuyo valor rms es I_1^{+a} . La carga reactiva-inductiva ($L_a=L_b=L_c$) demanda la corriente reactiva fundamental de secuencia positiva cuyo valor rms es I_1^{+r} . Debido a la naturaleza de las corrientes, la carga sólo demanda P_1^+ y Q_1^+ . Al ser un sistema equilibrado no existe circulación de corriente por el neutro. La representación de este caso puede verse en la figura 3-4, se utilizan valores de voltaje y corriente instantáneos.

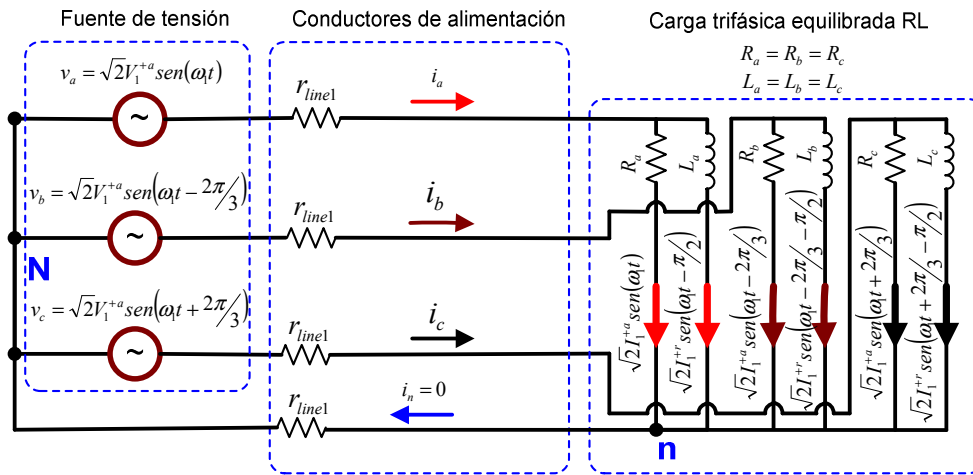


Figura 3-4. Sistema eléctrico con carga RL.

La relación entre los valores eficaces de las corrientes de la carga está dada por:

$$(I_1^+)^2 = (I_1^{+a})^2 + (I_1^{+r})^2 \quad (3.4)$$

I_1^{+a} corresponde a la componente activa de I_1^+ que se encuentra en fase con V_1^+ :

$$I_1^{+a} = I_1^+ \cos(\theta_1^+) \quad (3.5)$$

donde, θ_1^+ es el ángulo de desfase entre V_1^+ e I_1^+ . La corriente I_1^{+r} corresponde a la componente reactiva de I_1^+ que se encuentra en cuadratura con la tensión fundamental de secuencia positiva (V_1^+):

$$I_1^{+r} = I_1^+ \text{sen}(\theta_1^+) \quad (3.6)$$

La representación fasorial de I_1^{+a} e I_1^{+r} puede verse en la figura 3-5:

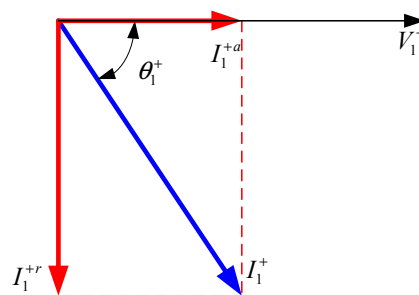


Figura 3-5. Representación fasorial de I_1^{+a} e I_1^{+r}

Capítulo 3. Pérdidas y efectos en los sistemas eléctricos provocados por la conexión de cargas ineficientes.

I_1^{+a} circula por los tres conductores de las fases, así que sustituyendo en (3.1) la expresión (3.5), $\Delta P_{P_1^+}$ está dada por:

$$\Delta P_{P_1^+} = 3 \cdot (I_1^{+a})^2 r_{lineal} = 3 \cdot (I_1^+ \cos(\theta_1^+))^2 r_{lineal} \quad (3.7)$$

De la misma forma, I_1^{+r} también circula por los tres conductores de las fases, así que sustituyendo en (3.1) la expresión (3.6), $\Delta P_{Q_1^+}$ está dada por:

$$\Delta P_{Q_1^+} = 3 \cdot (I_1^{+r})^2 r_{lineal} = 3 \cdot (I_1^+ \text{sen}(\theta_1^+))^2 r_{lineal} \quad (3.8)$$

En este caso ΔP_{line} está compuesta por $\Delta P_{P_1^+}$ y $\Delta P_{Q_1^+}$:

$$\Delta P_{line} = \Delta P_{P_1^+} + \Delta P_{Q_1^+} = 3(I_1^+)^2 r_{lineal} \quad (3.9)$$

Si se compara la expresión (3.2), que corresponde al caso ideal, con la expresión (3.9) se puede notar que la demanda de Q_1^+ :

- Provoca pérdidas adicionales en los conductores de alimentación.
- Influye directamente en el calentamiento de los conductores.
- Disminuye la capacidad de conducción de corriente eficiente de los conductores de alimentación.

Por estas razones resulta interesante compensar Q_1^+ en el lugar más cercano donde se demanda.

3.1.1.2. Sistema trifásico a 4 hilos con voltajes simétricos fundamentales y con carga netamente resistiva, lineal, y desequilibrada.

En este caso se considerará el sistema eléctrico de la figura 3-6, el cual es un sistema trifásico cuyos voltajes son simétricos y fundamentales (V_1^+). La carga es resistiva desequilibrada ($R_a \neq R_b \neq R_c$) y demanda corrientes activas fundamentales de diferente valor rms en cada fase (I_{1a} , I_{1b} , e I_{1c} $I_{1a} \neq I_{1b} \neq I_{1c}$). En este caso, la corriente que circula por el neutro es fundamental y no nula ($I_{1n} \neq 0$).

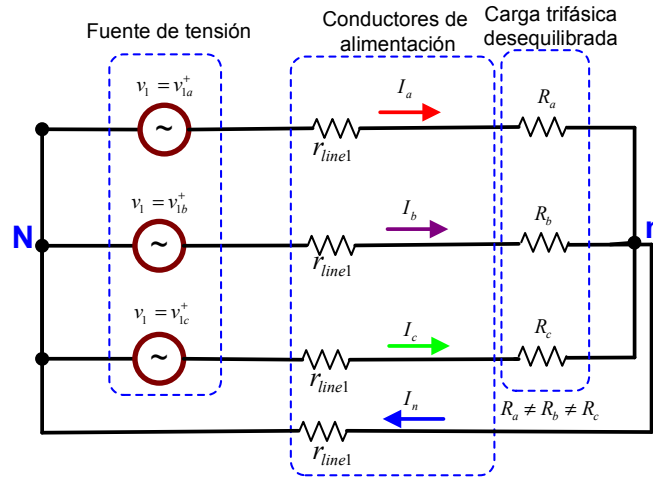


Figura 3-6. Sistema eléctrico con carga resistiva desequilibrada ($R_a \neq R_b \neq R_c$).

Las pérdidas de potencia en los conductores de alimentación pueden expresarse como sigue:

$$\Delta P_{line} = I_a^2 r_{line1} + I_b^2 r_{line1} + I_c^2 r_{line1} + I_n^2 r_{line1} \quad (3.10)$$

Los tres primeros términos de (3.10) corresponden a las pérdidas de potencia en los conductores de las fases, el cuarto término corresponde a la pérdida de potencia que se produce en el conductor de neutro.

Para lograr entender la composición de las pérdidas de potencia en los conductores de alimentación cuando las corrientes están desequilibradas, es necesario emplear el teorema de Stokvis-Fortescue [41]. El teorema de Stokvis-Fortescue establece que la suma de los cuadrados de las corrientes rms de cada fase pueden expresarse en términos de la suma de los cuadrados de sus componentes de secuencia:

$$I_a^2 + I_b^2 + I_c^2 = 3(I_1^+)^2 + (I_1^-)^2 + (I_1^0)^2 \quad (3.11)$$

Si se realiza el balance de corrientes en el nodo "n" de la figura 3-6, por el cable de neutro las corrientes fundamentales de secuencia positiva y negativa se anulan y las corrientes fundamentales de secuencia cero se suman. Así que el valor rms de la corriente que circula por el neutro puede expresarse como sigue:

$$I_n^2 = (3I_1^0)^2 \quad (3.12)$$

Llevando (3.11) y (3.12) a la ecuación (3.10) y agrupando términos, las pérdidas de potencia en los conductores de alimentación (conductores de las fases a , b , c , y n) en términos de las componentes simétricas son:

$$\Delta P_{line} = 3(I_1^+)^2 r_{line1} + 3(I_1^-)^2 r_{line1} + 12(I_1^0)^2 r_{line1} \quad (3.13)$$

Debido a que la carga sólo está compuesta por resistencias eléctricas, I_1^+ coincide con I_1^{+a} y la corriente I_1^{+r} es nula. El primer término de (3.13) corresponde a la pérdida de potencia debido a la demanda de P_1^+ ($\Delta P_{P_1^+}$), ecuación (3.7), el segundo y tercer términos de (3.13) corresponden a las pérdidas de potencia en los conductores de alimentación provocados por I_1^- e I_1^0 y está asociada a la demanda de $S_{U1\#}$ ($\Delta P_{S_{U1\#}}$).

$$\Delta P_{S_{U1\#}} = 3 \cdot (I_1^-)^2 r_{line1} + 12 \cdot (I_1^0)^2 r_{line1} \quad (3.14)$$

Con el objetivo de distinguir los términos de la ecuación (3.14), la pérdida de potencia provocada por I_1^- en los conductores de alimentación será denotado con $\Delta P_{I_1^-}$, y la pérdida de potencia provocada por I_1^0 en los conductores de alimentación será denotado con $\Delta P_{I_1^0}$:

$$\Delta P_{I_1^-} = 3(I_1^-)^2 r_{line1} \quad (3.15)$$

$$\Delta P_{I_1^0} = 12(I_1^0)^2 r_{line1} \quad (3.16)$$

A iguales valores de corriente rms ($|I_1^+| = |I_1^-| = |I_1^0|$) y partiendo de las expresiones (3.2), (3.15) y (3.16) se puede deducir que $\Delta P_{I_1^0}$ es cuatro veces mayor que $\Delta P_{I_1^-}$ o $\Delta P_{P_1^+}$. La circulación de $3I_1^0$ por el cable de neutro aumenta en un factor de 4 las pérdidas provocadas por I_1^0 . Bajo estas condiciones, $\Delta P_{I_1^0}$ provoca la mayor pérdida en los conductores de alimentación [26], [40], y [49].

En el caso particular de que el conductor de neutro fuera diseñado con una sección menor que la sección de los conductores de las fases [26], el conductor de neutro tendría una resistencia mayor y las pérdidas de potencia se incrementarían. En [26] se define el parámetro ρ como la relación entre la resistencia del neutro ($r_{neutro1}$) y la resistencia de línea (r_{line1}). En este caso, $\Delta P_{S_{U1\#}}$ puede normalizarse con respecto a r_{line1} y calcularse como sigue:

$$\frac{\Delta P_{S_{U1\#}}}{r_{line1}} = 3 \cdot (I_1^-)^2 + 3 \cdot (I_1^0)^2 + 9(I_1^0)^2 \rho = 3 \cdot (I_1^-)^2 + (I_1^0)^2 (3 + 9\rho) \quad (3.17)$$

En el caso concreto en el que $r_{neutro1} > r_{line1}$, ρ siempre es mayor que 1. Así que, el tercer término de (3.17) indica que la influencia de I_1^0 es aún mayor en $\Delta P_{S_{U1\#}}$ cuando la resistencia del neutro es mayor que las resistencias de las líneas.

En el caso analizado en esta sección, ΔP_{line} está compuesto por $\Delta P_{P_1^+}$ y por $\Delta P_{S_{U1\#}}$:

$$\Delta P_{line} = \Delta P_{P_1^+} + \Delta P_{S_{U1\#}} \quad (3.18)$$

A iguales valores de corriente rms ($|I_1^-| = |I_1^0|$), $\Delta P_{S_{U1\#}}$ puede ser reducida si se reduce I_1^- , ó I_1^0 . De acuerdo a las ecuaciones (3.15) y (3.16), $\Delta P_{S_{U1\#}}$ puede reducirse más si se compensa I_1^0 que si se compensa I_1^- .

3.1.1.3. Sistema trifásico a 4 hilos con voltajes simétricos fundamentales y con carga netamente resistiva, no lineal, y equilibrada.

En este caso se considerará el sistema eléctrico de la figura 3-7, el cual es un sistema con voltajes simétricos fundamentales (V_1^+). La carga es resistiva equilibrada ($R_a=R_b=R_c$) y está conectada en paralelo con una carga no lineal equilibrada ($D_a=D_b=D_c$), ($R_a // D_a=R_b // D_b=R_c // D_c$). La carga demanda la corriente activa fundamental de secuencia positiva (I_1^{+a}), y corrientes no fundamentales (I_H). I_H puede descomponerse en corriente no fundamental de secuencia positiva (I_H^+), la corriente no fundamental de secuencia negativa (I_H^-), y la corriente no fundamental de secuencia cero (I_H^0) [42]. En el conductor de neutro se anulan I_1^{+a} , I_H^+ , e I_H^- . Por el conductor de neutro, en este caso, sólo circulan las componentes de secuencia cero ($3I_H^0$). La resistencia de los conductores de las fases y del neutro, a pesar de que se estudian componentes armónicas de corriente, se supondrán iguales a la resistencia a frecuencia fundamental (r_{line1}) tal como se propone en [45], [50]-[51]. La figura 3-7 muestra los voltajes y corrientes instantáneos para este caso.

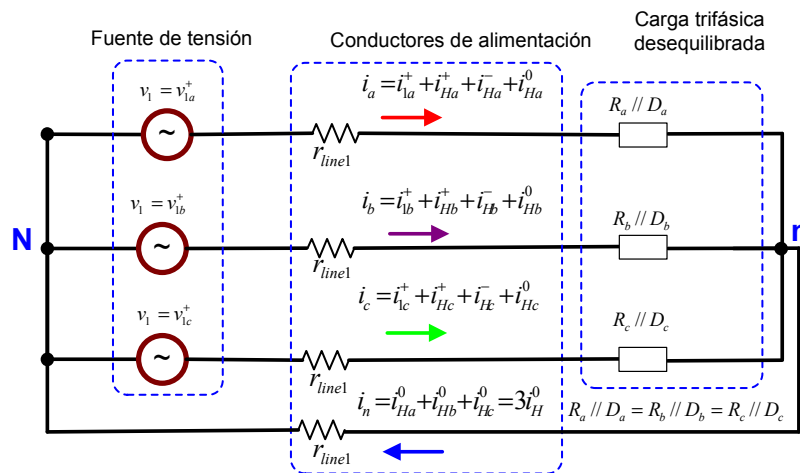


Figura 3-7. Sistema eléctrico con carga no lineal equilibrada ($R_a // D_a=R_b // D_b=R_c // D_c$).

I_1^{+a} al circular por los conductores de las fases provoca $\Delta P_{P_1^+}$, ecuación (3.7). I_H^+ , I_H^- , e I_H^0 , al igual que I_1^{+a} , también circulan por los conductores de las fases. I_H^0 , además, circula por el

Capítulo 3. Pérdidas y efectos en los sistemas eléctricos provocados por la conexión de cargas ineficientes.

neutro de la instalación. I_H^+ , I_H^- e I_H^0 al circular por los conductores de alimentación provocan la pérdida de potencia asociada con la demanda de $S_{eN\#}$ en la carga ($\Delta P_{S_{eN\#}}$):

$$\Delta P_{S_{eN\#}} = 3 \cdot (I_H^+)^2 r_{line1} + 3 \cdot (I_H^-)^2 r_{line1} + 3(I_H^0)^2 r_{line1} + (3I_H^0)^2 r_{line1} \quad (3.19)$$

El primer, segundo y tercer término de (3.19) son las pérdidas de potencia provocadas por I_H^+ , I_H^- e I_H^0 en los conductores de las fases. El cuarto término de (3.19) es la pérdida de potencia provocada por I_H^0 en el conductor del neutro. La ecuación (3.19) puede expresarse de una forma más simplificada como sigue:

$$\Delta P_{S_{eN\#}} = 3 \cdot (I_H^+)^2 r_{line1} + 3 \cdot (I_H^-)^2 r_{line1} + 12(I_H^0)^2 r_{line1} \quad (3.20)$$

La pérdida de potencia provocada por corrientes no fundamentales equilibradas de secuencia positiva ($\Delta P_{I_H^+}$), negativa ($\Delta P_{I_H^-}$), y cero ($\Delta P_{I_H^0}$) son respectivamente:

$$\Delta P_{I_H^+} = 3(I_H^+)^2 r_{line1} \quad (3.21)$$

$$\Delta P_{I_H^-} = 3(I_H^-)^2 r_{line1} \quad (3.22)$$

$$\Delta P_{I_H^0} = 12(I_H^0)^2 r_{line1} \quad (3.23)$$

A iguales valores de corriente rms ($|I_H^+| = |I_H^-| = |I_H^0|$) y partiendo de las expresiones (3.2), (3.21), (3.22) y (3.23) se puede deducir que $\Delta P_{I_H^0}$ es cuatro veces mayor que $\Delta P_{I_H^+}$, $\Delta P_{I_H^-}$ o $\Delta P_{I_H^+}$. Esto se debe a la circulación de I_H^0 por el cable de neutro. La cuantificación de pérdida de potencia provocada por I_H^0 sobre los cables de alimentación se realiza de la misma forma que la cuantificación de pérdida de potencia provocada por I_1^0 .

En el caso de que I_H^0 sea mayor o igual que I_1^+ , la corriente del neutro podría ser mayor que la corriente de las fases. En este caso, la corriente nominal del neutro se superaría, se puede sobrepasar el límite térmico del conductor y fácilmente su alma conductora se fundiría y su aislamiento se quemaría o destruiría.

3.1.1.4. Resumen de las pérdidas de potencia en los conductores de alimentación.

Para el resumen de la pérdida de potencia en los conductores de alimentación, se tendrá en cuenta un caso en el que existen todas las potencias ineficientes de la carga. En este caso, la tensión de suministro es simétrica fundamental (V_1^+). La carga resistiva desequilibrada ($R_a \neq R_b \neq R_c$) está conectada en paralelo con una carga reactiva inductiva equilibrada ($L_a = L_b = L_c$) y con una carga no lineal equilibrada ($D_a = D_b = D_c$). Las relaciones entre las partes de la carga y las componentes de la corriente son las siguientes:

Capítulo 3. Pérdidas y efectos en los sistemas eléctricos provocados por la conexión de cargas ineficientes.

- La carga resistiva desequilibrada provoca la demanda de I_1^{+a}, I_1^-, I_1^0 .
- La carga inductiva equilibrada provoca la demanda de I_1^{+r} .
- La carga no lineal equilibrada provoca la demanda de I_H^+, I_H^-, I_H^0 .

Por los conductores de las fases circulan todas las componentes de corriente. Por el conductor del neutro sólo circulan las componentes de corriente de secuencia cero I_1^0 , e I_H^0 . La resistencia de los conductores de las fases y del neutro son iguales a r_{line1} . La representación de este caso puede verse en la figura 3-8, donde se utilizan valores de voltaje y corriente instantáneos.

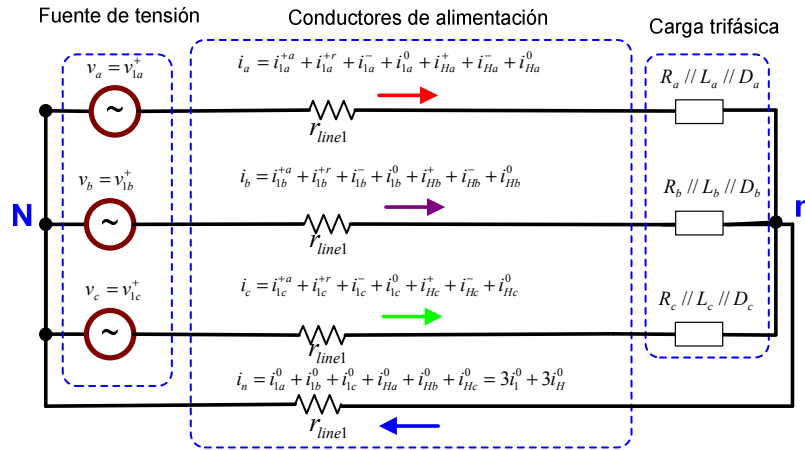


Figura 3-8. Sistema eléctrico para la carga bajo estudio.

Al circular por los conductores de alimentación: I_1^{+a} provoca $\Delta P_{P_1^+}$. I_1^{+r} provoca $\Delta P_{Q_1^+}$. I_1^- e I_1^0 provocan $\Delta P_{S_{U1\#}}$ e I_H^+, I_H^- e I_H^0 provoca $\Delta P_{S_{\Delta V\#}}$. En la figura 3-9 se muestra la descomposición de las pérdidas de potencia de los conductores de alimentación.

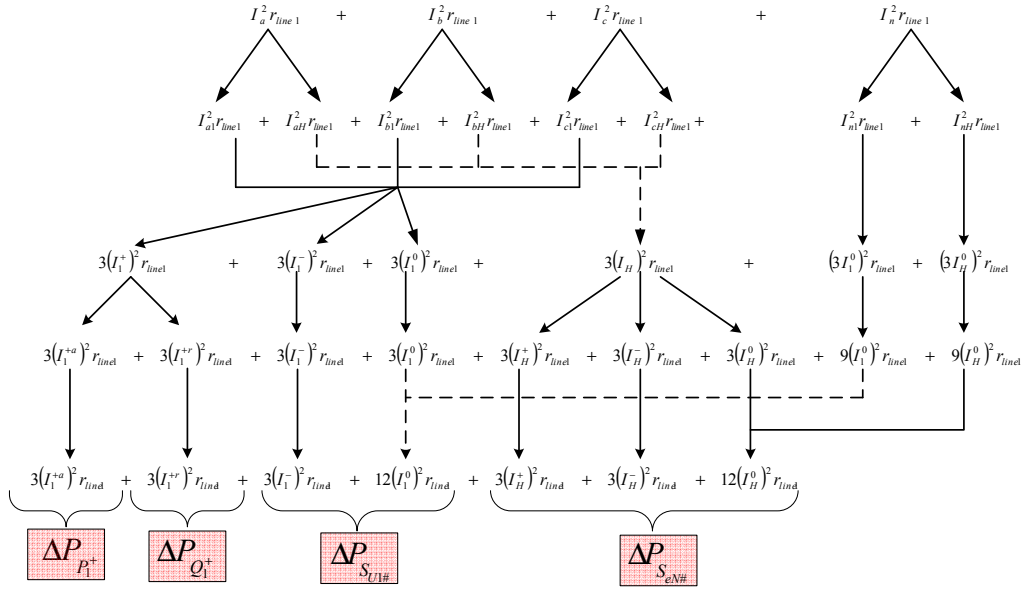


Figura 3-9. Descomposición de las pérdidas de potencia en los conductores de alimentación según las potencias demandadas por la carga.

En general, cuando la carga demanda todas las potencias, ΔP_{line} está dada por:

$$\Delta P_{line} = 3(I_1^{+a})^2 r_{line1} + 3(I_1^{+r})^2 r_{line1} + 3(I_1^-)^2 r_{line1} + 12(I_1^0)^2 r_{line1} + 3(I_H^+)^2 r_{line1} + 3(I_H^-)^2 r_{line1} + 12(I_H^0)^2 r_{line1} \quad (3.24)$$

Todas las pérdidas de potencia provocadas por las potencias ineficientes de la carga pueden ser reducidas mediante el uso de diferentes técnicas de compensación. La única pérdida de potencia que no puede ser reducida es $\Delta P_{P_1^+}$, ya que es una pérdida inevitable debido a que P_1^+ es la única potencia eficiente demandada por la carga.

Generalizando un poco más, teniendo en cuenta todas las condiciones para deducir la ecuación (3.24), pero evaluando el caso cuando la sección del conductor de neutro es diferente a la sección de los conductores de las líneas ($r_{neutro1} \neq r_{line1}$). La ecuación (3.24) puede transformarse como sigue:

$$\Delta P_{line} = 3(I_1^{+a})^2 r_{line1} + 3(I_1^{+r})^2 r_{line1} + 3(I_1^-)^2 r_{line1} + (3 + 9\rho)(I_1^0)^2 r_{line1} + 3(I_H^+)^2 r_{line1} + 3(I_H^-)^2 r_{line1} + (3 + 9\rho)(I_H^0)^2 r_{line1} \quad (3.25)$$

La variación de ρ gobierna la variación de ΔP_{line} . Cuando la resistencia del neutro es mayor que la resistencia de las líneas ($r_{neutro1} > r_{line1}$), ΔP_{line} se incrementa. De acuerdo a (3.25), para minimizar el valor de ΔP_{line} hay que reducir las pérdidas del conductor del neutro, lo que es posible reduciendo la corriente que circula por el neutro o reduciendo su resistencia.

3.1.2. Otros efectos provocados por la circulación de corrientes por los conductores de alimentación.

La circulación de corrientes por los conductores de alimentación también provocan los siguientes efectos:

- Caídas de tensión (c.d.t) en los conductores de alimentación, y tensión asimétrica y distorsionada en bornes de la carga.
- Las c.d.t provocan a su vez demanda de potencia adicionales en la carga.
- Las c.d.t también provocan circulación de corrientes no eficientes hacia otras cargas eficientes vecinas conectadas sobre la misma red de distribución.

A continuación se explicará la manera en la cual estos efectos se producen en los sistemas eléctricos de potencia.

3.1.2.1. Caídas de tensión (c.d.t) en los conductores de alimentación, y tensión asimétrica y distorsionada en bornes de la carga.

Debido a que la carga puede ser reactiva, desequilibrada y no lineal, por los conductores de alimentación puede circular las siguientes componentes de corriente: I_1^+ , I_1^- , I_1^0 , I_H^+ , I_H^- , e I_H^0 . Estas corrientes, al circular por los conductores de alimentación provocan c.d.t. Las c.d.t se ocasionan debido a que los conductores no son ideales y tienen resistencia no nula. Las c.d.t modifican la tensión de alimentación en el punto de conexión de la carga. Las c.d.t en los conductores de alimentación están dadas por el producto entre la corriente que circula por el conductor y la resistencia del conductor. En la siguiente expresión, se muestra la c.d.t por fase en los conductores de alimentación (ΔV_{line_z}) ($z=a,b,c$):

$$\Delta V_{line_z} = I_z r_{line1} \quad (3.26)$$

A continuación se analizará como influyen las corrientes demandadas por la carga en la tensión de alimentación en el pcc analizando individualmente cada corriente aunque conlleve a casos ficticios pero útiles para entender los efectos provocados. Se supondrá un sistema eléctrico de bus infinito, es decir un sistema de potencia ideal en el que no varían ni el voltaje ni la frecuencia:

Variación del voltaje en el pcc provocado por la demanda de I_1^{+a} : en esta situación se considerará el circuito equivalente de la figura 3-10. En la izquierda se muestra la representación por fase de un sistema trifásico, y en la derecha se muestra su diagrama fasorial. La red eléctrica proporciona la tensión de suministro V_{1z}^+ y alimenta una carga que sólo demanda I_{1z}^{+a} . La corriente es suministrada a la carga a través de conductores cuya resistencia por fase es r_{line1} y cuya resistencia de neutro es $r_{neutro1}$. En este caso, I_{1z}^{+a} provoca c.d.t en los

conductores de las fases (ΔV_{1z}^{+a}) disminuyendo la tensión en el punto de conexión de la carga (V_{1z}^{+load}). Al ser equilibrada no hay circulación de corriente por el neutro ($I_n=0$), por lo que no existen c.d.t. en dicho conductor ($\Delta V_n=0$). La demanda de I_{1z}^{+a} ocasiona que en el punto de conexión de la carga se establezcan tensiones simétricas de menor amplitud y en fase con respecto a las tensiones del sistema eléctrico de potencia.

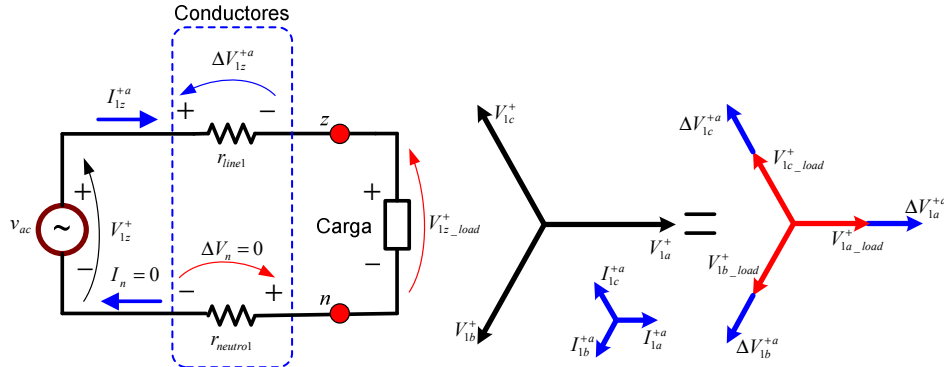


Figura 3-10. c.d.t provocada por I_{1z}^{+a} en los conductores de alimentación (modelo por fase) y representación fasorial del sistema trifásico de las tensiones.

Variación del voltaje en el pcc provocado por la demanda de I_1^{+r} : en esta situación se considerará el caso ficticio cuyo circuito equivalente es mostrado en la figura 3-11. En la izquierda se muestra la representación por fase de un sistema trifásico, y en la derecha se muestra su diagrama fasorial, en el que se ha considerado que las cargas son inductivas. La tensión de alimentación sólo está conformada por V_{1z}^{+} y la carga inductiva sólo demanda I_{1z}^{+r} . En este caso I_{1z}^{+r} provoca c.d.t en los conductores de las fases (ΔV_{1z}^{+r}), ocasionando la variación de la tensión en el punto de conexión de la carga (V_{1z}^{+load}). Al ser la carga equilibrada no hay circulación de corriente por el neutro ($I_n=0$), por lo que no existen c.d.t. en dicho conductor ($\Delta V_n=0$). La amplitud de V_{1z}^{+load} es mayor que la amplitud de V_{1z}^{+} , también V_{1z}^{+load} se encuentra adelantado con respecto a V_{1z}^{+} . La demanda de la corriente inductiva (I_{1z}^{+r}) ocasiona que en el punto de conexión de la carga se establezcan tensiones simétricas de mayor amplitud y adelantadas (en el caso particular analizado) con respecto a las tensiones del sistema eléctrico de potencia.

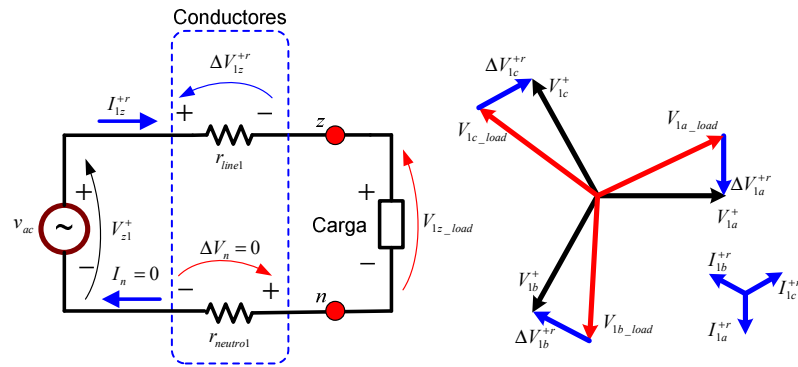


Figura 3-11. c.d.t provocada por I_{1z}^{+-} (por fase) y representación fasorial de las magnitudes del circuito trifásico.

Variación del voltaje en el pcc provocado por la demanda de I_1^0 : en esta situación se considerará el caso ficticio cuyo circuito equivalente es mostrado en la figura 3-12. En la izquierda se muestra la representación por fase de un sistema trifásico, y en la derecha se muestra su diagrama fasorial. La tensión de suministro sólo está conformada por V_{1z}^+ y alimenta una carga que sólo demanda I_1^0 , considerándose I_1^0 en fase con V_{1a}^+ . En este caso, I_1^0 provoca c.d.t en los conductores de las fases (ΔV_1^0) y en el conductor del neutro ($3\Delta V_1^0$), ocasionando la variación de la amplitud y fase de la tensión en el punto de conexión de la carga (V_{1z_load}) y desfasando la tensión en el punto de conexión de la carga. La c.d.t total por fase en los conductores de alimentación, teniendo en cuenta el neutro como conductor de retorno, es de ($4\Delta V_1^0$). Para el caso analizado, la tensión en la fase *a* en el punto de conexión de la carga disminuye, mientras que las tensiones en las fases *b* y *c* aumentan. Para la corriente considerada en la figura, la tensión de la fase *a* en la carga permanece en fase con la tensión de alimentación, la tensión de la fase *b* en la carga se atrasa con respecto a la tensión de alimentación, y la tensión de la fase *c* en la carga se adelanta con respecto a la tensión de alimentación. La demanda de I_1^0 ocasiona que en el punto de conexión de la carga se establezcan tensiones asimétricas.

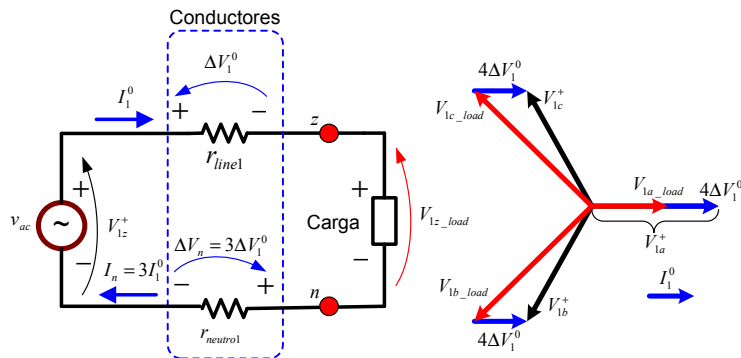


Figura 3-12. c.d.t provocada por I_1^0 (por fase) y representación fasorial de las magnitudes del sistema trifásico.

Variación del voltaje en el pcc provocado por la demanda de I_{1z}^- : en esta situación se considerará el caso ficticio cuyo circuito equivalente es mostrado en la figura 3-13. En la izquierda se muestra la representación por fase de un sistema trifásico, y en la derecha se muestra su diagrama fasorial. La tensión de suministro sólo está conformada por V_{1z}^+ y alimenta una carga que sólo demanda I_{1z}^- , se considerará I_{1a}^- en fase con V_{1a}^+ . En este caso, I_{1z}^0 provoca c.d.t en los conductores de las fases (ΔV_{1z}^-) ocasionando la variación de la tensión en el punto de conexión de la carga (V_{1z_load}) y desfasando la tensión en el punto de conexión de la carga. La tensión en la fase *a* en el punto de conexión de la carga disminuye, mientras que las tensiones en las fases *b* y *c* aumentan. Para la corriente considerada en la figura, la tensión de la fase *a* en la carga permanece en fase con la tensión de alimentación, la tensión de la fase *b* en la carga se adelanta con respecto a la tensión de alimentación, y la tensión de la fase *c* en la carga se atrasa con respecto a la tensión de alimentación. La demanda de I_{1z}^- ocasiona que en el punto de conexión de la carga se establezcan tensiones asimétricas.

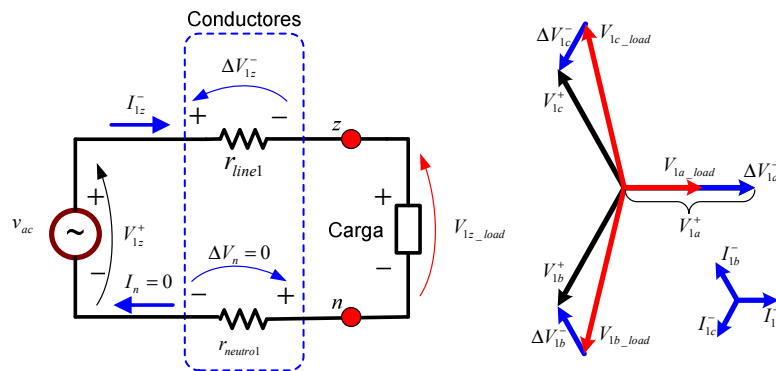


Figura 3-13. c.d.t provocada por I_{1z}^- (por fase) y representación de las principales magnitudes fasoriales del sistema trifásico.

Variación del voltaje en el pcc provocado por la demanda de I_H : en esta situación se considerará el caso ficticio cuyo circuito equivalente es mostrado en la figura 3-14. En la izquierda se muestra la representación por fase de un sistema trifásico, y en la derecha se muestra las formas de onda de las tensiones en la fase *a* en un periodo de tiempo. La tensión de suministro sólo está conformada por V_{1z}^+ y alimenta una carga que sólo demanda I_{3z} . En este caso, I_{3z} provoca c.d.t en los conductores de las fases (ΔV_{3z}) y en el conductor de neutro (ΔV_{3n}). En el punto de conexión de la carga se establece una tensión deformada (V_{z_load}) producto de la c.d.t no fundamental en los conductores de alimentación.

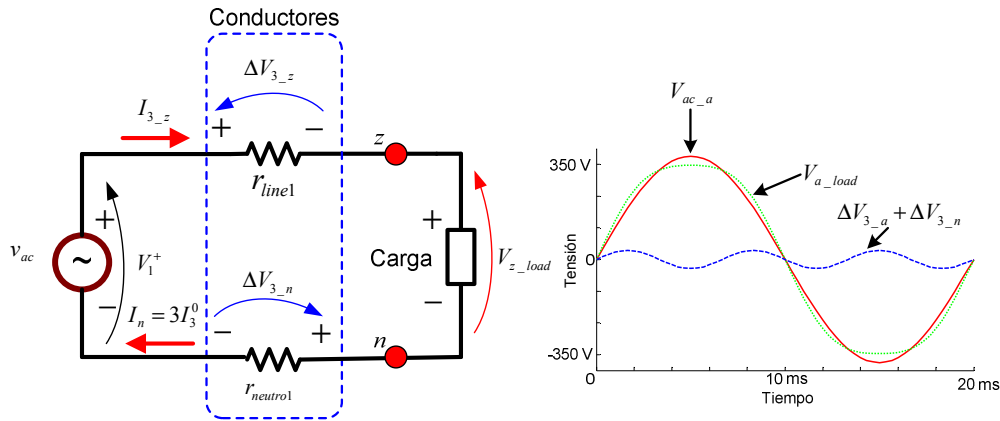


Figura 3-14. c.d.t provocada por I_{3-z} en los conductores de alimentación (modelo por fase) y formas de onda de las tensiones en el circuito para la fase a con (tensión de suministro ($V_{ac-a}=230$ V_{rms} y $f=50$ Hz), caída de tensión ($\Delta V_{3-a}+\Delta V_{3-n}=20$ V_{rms} y $f=150$ Hz), y tensión en la carga (V_{a-load})).

Resumen variación del voltaje en el pcc: la variación de voltaje en el pcc depende de todos los efectos descritos previamente. La demanda de I_1^+ , I_1^- , I_H^+ , e I_H^- sólo provoca c.d.t en los conductores de las fases, mientras que la demanda de I_1^0 , e I_H^0 provoca caídas de tensión en los conductores de las fases y en el conductor del neutro. La demanda de I_1^{+a} sólo reduce la amplitud de la tensión en el pcc, efecto no se puede evitar ya que I_1^{+a} es la única corriente de la carga que es considerada eficiente. La demanda de I_1^{+r} ocasiona el aumento de la tensión en el pcc pero ocasiona su desfase con respecto a la tensión de la fuente, efecto se puede evitar si se compensa Q_1^+ en bornes de la carga. La demanda de I_1^- e I_1^0 ocasiona asimetrías en la tensión del pcc, efecto se puede evitar si se compensa en la carga $S_{U1\#}$. La demanda de I_H ocasiona la distorsión de la tensión en el pcc, efecto se puede evitar si se compensa en la carga $S_{eN\#}$.

3.1.2.2. Circulación de corrientes ineficientes hacia otras cargas vecinas eficientes.

Como se ha expuesto en el punto anterior, I_1^+ , I_1^- , I_1^0 , I_H^+ , I_H^- , e I_H^0 ocasionan c.d.t en los conductores que alimentan las cargas modificando la tensión en las líneas de distribución, Estas c.d.t. influyen en todas las cargas que se encuentren conectadas en paralelo. Para el análisis se considerará el sistema eléctrico de la figura 3-15:

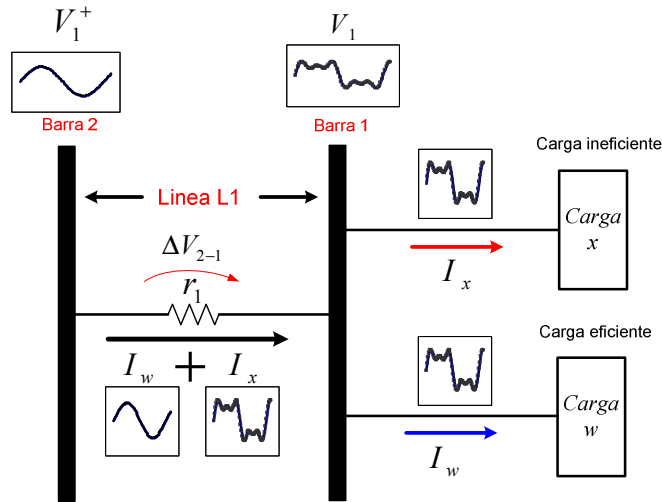


Figura 3-15. Influencia de las cargas ineficientes en cargas eficientes.

En la figura 3-15 pueden verse la carga x y la carga w conectadas en paralelo a través de la barra 1. La barra 1 está conectada con la barra 2 mediante la línea de distribución L1 de resistencia r_1 . En la barra 2 se considera un sistema de potencia infinita donde se establece una tensión fundamental de secuencia positiva (V_1^+). Se considera que la carga x (carga ineficiente) demanda la corriente I_x compuesta por I_1^+ , I_1^- , I_1^0 , I_H^+ , I_H^- , e I_H^0 , mientras que la carga w (carga eficiente) es una carga netamente resistiva y equilibrada que demanda la corriente I_w . Por la línea L1 circulan I_x e I_w , lo que ocasiona la c.d.t en r_1 (ΔV_{2-1}) deformando la tensión de la barra 1 (V_1). Debido a que carga la w es netamente resistiva y equilibrada, la corriente I_w depende de V_{2-1} y está compuesta por componentes de corriente eficiente e ineficientes (I_1^+ , I_1^- , I_1^0 , I_H^+ , I_H^- , e I_H^0). En este caso, si la carga x no estuviera conectada, la corriente I_w sólo estaría compuesta por I_1^+ , por lo que, la carga x perjudica a la carga w provocando distorsión, desequilibrio, y pérdidas de potencia. Este problema ha sido estudiado principalmente en la influencia de las cargas no lineales en otras cargas vecinas [51]. En los motores, la existencia de un sistema de tensiones distorsionado y asimétrico provoca pares pulsantes, vibraciones mecánicas y pérdidas de potencia [45].

En conclusión, las corrientes ineficientes de la carga al circular por los conductores de alimentación provocan:

- Pérdidas de potencia en los conductores de alimentación.
- Caídas de tensión en los conductores de alimentación.
- Variación de la amplitud de la tensión en el pcc.
- Distorsión y asimetría de la tensión en el pcc.

Capítulo 3. Pérdidas y efectos en los sistemas eléctricos provocados por la conexión de cargas ineficientes.

- Circulación de corrientes ineficientes hacia cargas eficientes provocadas por la distorsión y asimetría de la tensión en el pcc.

3.2. Pérdidas en transformadores provocados por la conexión de cargas ineficientes.

El transformador en los sistemas eléctricos es un elemento utilizado para cambiar el nivel de tensión y está compuesto por devanados acoplados magnéticamente a través de un núcleo ferromagnético. De ahora en adelante por convención, el devanado primario, cuyas variables serán denotadas con el subíndice “ p ”, es el devanado de tensión más alta (AT) donde se conecta a la red eléctrica. El devanado secundario, cuyas variables serán denotadas con el subíndice “ s ”, es el devanado de tensión más baja (BT) donde se conecta la carga. Para referirse, en general, a las tres fases a, b, c se utilizará el subíndice z . El núcleo ferromagnético acopla magnéticamente los devanados de AT y BT, y sus variables serán denotadas con el subíndice “ m ”. Para el análisis de las pérdidas del transformador, se tendrá en cuenta el transformador de potencia trifásico con conexión Δ -Yn, tal como se muestra en la figura 3-16. La conexión Δ -Yn es más común en los sistemas eléctricos de distribución. En el devanado primario se establecen las tensiones rms compuestas de alimentación (V_{ab_p} , V_{bc_p} , y V_{ca_p}) y las corrientes rms por devanado (I_{ab_p} , I_{bc_p} , e I_{ca_p}). De la misma forma, en el devanado secundario se establecen las tensiones rms fase-neutro (V_{a_s} , V_{b_s} , y V_{c_s}) y las corrientes rms por devanado (I_{a_s} , I_{b_s} , e I_{c_s}).

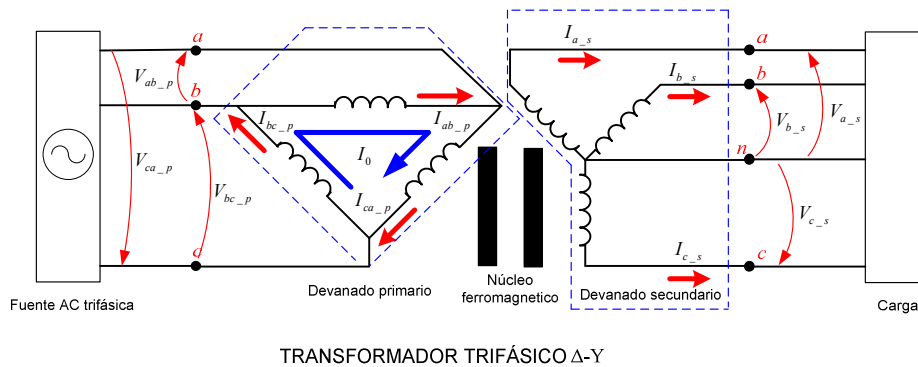


Figura 3-16. Transformador de potencia trifásico con conexión Δ -Yn.

En el análisis, se considerará el transformador de la figura 3-16 sin asimetrías ni imperfecciones. Las resistencias y reactancias por fase se considerarán iguales, tampoco se considerará el efecto de la frecuencia en las resistencias, tal como lo propone [45]. De acuerdo a las anteriores consideraciones, el transformador de la figura 3-16 puede modelarse con ayuda del circuito simplificado por fase mostrado en la figura 3-17 e introducido en [52], en el cual:

r_{trafo1_p} : es la resistencia del devanado primario por fase.

Capítulo 3. Pérdidas y efectos en los sistemas eléctricos provocados por la conexión de cargas ineficientes.

x_{trafo1_p} : es la reactancia del devanado primario por fase.

r_{trafo1_s} : es la resistencia del devanado secundario por fase.

x_{trafo1_s} : es la reactancia del devanado secundario por fase.

r_{trafo1_m} : es la resistencia que modela el núcleo del transformador por fase.

x_{trafo1_m} : es la reactancia que modela el núcleo del transformador por fase.

I_{z_m} : es la corriente rms de magnetización del núcleo del transformador por fase.

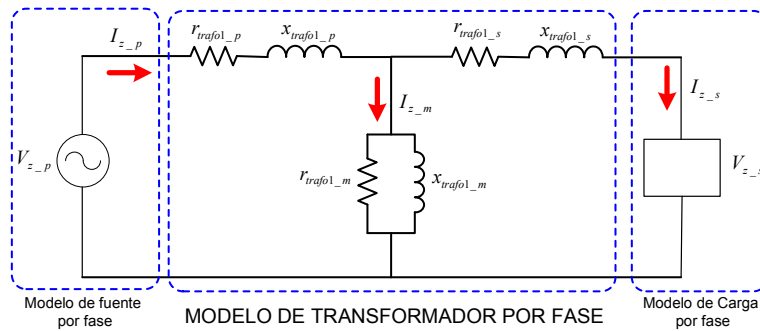


Figura 3-17. Modelo simplificado del transformador por fase propuesto en [52].

De acuerdo a [45], [53]-[54] la pérdida de potencia del transformador (ΔP_{trafo}) se divide en:

- Pérdidas provocadas por la corriente de carga (pérdidas con carga) (ΔP_{trafo_load}).
- Pérdidas internas del transformador que no dependen de la corriente de la carga ($\Delta P_{trafo_no_load}$), si no de la corriente de magnetización del núcleo del transformador.

$$\Delta P_{trafo} = \Delta P_{trafo_load} + \Delta P_{trafo_no_load} \quad (3.27)$$

ΔP_{trafo_load} se puede dividir a su vez en:

- Las pérdidas en el cobre (ΔP_{Cu}).
- Las pérdidas provocadas por las corrientes de Eddy inducidas en los devanados y en el núcleo (ΔP_{EC}) (El subíndice *EC* son siglas provenientes del inglés y significan Eddy Current).

Capítulo 3. Pérdidas y efectos en los sistemas eléctricos provocados por la conexión de cargas ineficientes.

- Las pérdidas provocadas por las corrientes de Eddy inducidas en la carcasa y herrajes metálicos del transformador (ΔP_{OSL}) (El subíndice *OSL* son siglas provenientes del inglés y significan Other Stray Losses).

$$\Delta P_{trafo_load} = \Delta P_{Cu} + \Delta P_{EC} + \Delta P_{OSL} \quad (3.28)$$

$\Delta P_{trafo_no_load}$ se puede dividir a su vez en.

- Las pérdidas provocadas por la histéresis del núcleo (ΔP_{Hist}).
- Las pérdidas en el cobre en vacío ($\Delta P_{Cu_no_load}$).
- Las pérdidas provocadas por las corrientes de Eddy en vacío ($\Delta P_{EC_no_load}$):

$$\Delta P_{trafo_noload} = \Delta P_{Hist} + \Delta P_{Cu_no_load} + \Delta P_{EC_no_load} \quad (3.29)$$

La división de las pérdidas de potencia del transformador puede verse en el diagrama de la figura 3-18:

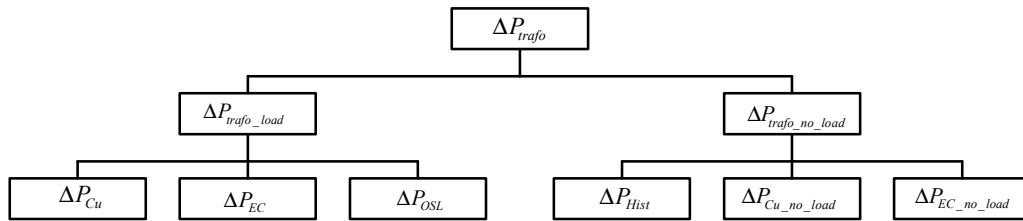


Figura 3-18. División de pérdidas de potencia en los transformadores

Estas pérdidas de potencia se convierten en calor y según los estudios realizados por [55] provocan:

- Calentamientos excesivos en los devanados y componentes del transformador.
- Disminución de la vida útil del transformador envejeciendo de forma prematura núcleo y devanados.
- Potencia de operación superior a la potencia nominal, ya que el transformador debe convertir la potencia que demanda la carga y la potencia que se convierte en pérdidas.
- Daños técnicos tales como destrucción de aislamiento y fundición de bobinas, núcleos y carcasa.
- Incremento de la factura de energía de los consumidores que poseen transformadores de media tensión.

Muchos de los transformadores en los sistemas de potencia se encuentran subdimensionados por las siguientes causas:

Capítulo 3. Pérdidas y efectos en los sistemas eléctricos provocados por la conexión de cargas ineficientes.

- Cálculo de la potencia del transformador realizado en base a la potencia nominal que aprovecha la carga, sin tener en cuenta la existencia de las potencias ineficientes que la carga puede demandar.
- Aumento gradual y no programado en la carga que alimentan los transformadores.

En [56], se utiliza la estrategia de diseño basada en el factor K . El factor K se utiliza para dimensionar correctamente la potencia de los transformadores en presencia de cargas no lineales. En la etapa de diseño y montaje utilizar el factor K puede ser de utilidad ya que se prevé realmente la potencia que se va a demandar. En las instalaciones eléctricas existentes con transformadores sobrecargados usar el factor K equivale a cambiar el transformador por un transformador de mayor capacidad, lo cual incurre en mayores gastos de instalación. Utilizar el factor K para rediseñar el transformador soluciona el problema de sobrecarga provocada por las ineficiencias de potencia de la carga, sin embargo, no soluciona las pérdidas de potencia que aparecen en el transformador.

Para solucionar el problema de la sobrecarga y la pérdida de potencia en los transformadores, la mejor estrategia es compensar las ineficiencias de potencia donde se producen. Los compensadores activos paralelo ubicados cerca de la carga ineficiente corrigen ambos problemas llevando al sistema a condiciones más óptimas de funcionamiento. Adicionalmente, utilizar un compensador activo que trabaje de forma selectiva contribuye a que se pueda reducir la ineficiencia de potencia que más pérdidas de potencia y perjuicios le ocasionan al transformador.

Para determinar ΔP_{trafo} es posible usar la prueba con carga de los transformadores, la cual consiste en medir la potencia activa y la corriente en cada uno de los devanados con la carga habitual del transformador, tal como se muestra en la figura 3-19.

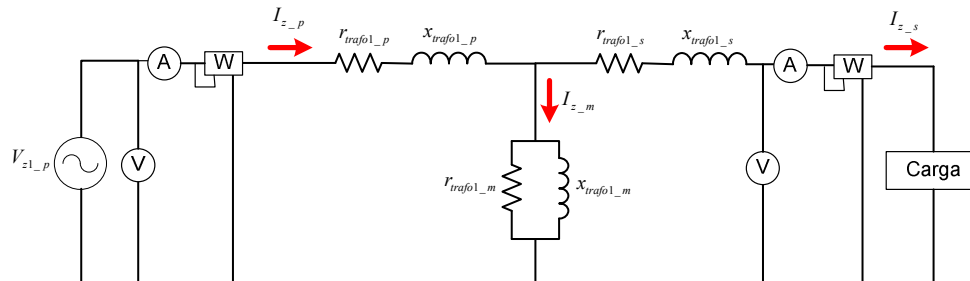


Figura 3-19. Prueba con carga de los transformadores, representación por fase.

La prueba con carga de los transformadores sirve para medir las pérdidas de potencia del transformador cuando el transformador alimenta su carga habitual. En esta prueba se miden las pérdidas reales en funcionamiento. En bastantes ocasiones la carga de los transformadores es variable, por lo que para medir sus pérdidas se debe medir en un intervalo razonable de tiempo

ó escoger la peor condición de carga del transformador. La medida de corriente en los devanados primarios y secundarios sirve para calcular ΔP_{Cu} y ΔP_{EC} . Para distinguir con mayor certeza estas pérdidas es necesario medir la corriente en las tres fases de los dos devanados y utilizar un instrumento que mida las componentes armónicas de corriente. El procedimiento de cálculo para ΔP_{Cu} y ΔP_{EC} será detallado con mayor detalle posteriormente. El vatímetro que mide la potencia en el devanado primario registra la potencia que debe suministrar la red eléctrica al transformador (P_{trafo_p}), mientras que el vatímetro que mide la potencia en el devanado secundario registra la potencia que demanda la carga (P_{trafo_s}). P_{trafo_p} está compuesta por P_{trafo_s} y por las pérdidas que se producen en el transformador (ΔP_{trafo}). ΔP_{trafo} puede calcularse como sigue:

$$\Delta P_{trafo} = P_{trafo_s} - P_{trafo_p} \quad (3.30)$$

Con la ecuación (3.30) es posible obtener las pérdidas de potencia del transformador. Sin embargo no es posible distinguir cada una de las pérdidas ni distinguir su origen. A continuación se propondrá un procedimiento para obtener las pérdidas de potencia en los transformadores. A partir de las expresiones convencionales de las pérdidas de los transformadores, se propondrán nuevas expresiones que relacionan las pérdidas de los transformadores con las diferentes potencias que demanda la carga (P_1^+ , Q_1^+ , $S_{U1\#}$, y $S_{eN\#}$). También se propondrán procedimientos experimentales para distinguir cada una de las pérdidas de los transformadores, en el siguiente análisis serán tenidas en cuenta ΔP_{Cu} , ΔP_{EC} , ΔP_{OSL} , y ΔP_{Hist} .

3.2.1. Pérdida de potencia provocada por la histéresis del núcleo del transformador.

Al magnetizar un material ferromagnético como el núcleo de un transformador, a través de una fuente electromotriz o fuente de excitación, se produce el fenómeno de histéresis. La histéresis consiste en que tras retirar la fuente de excitación parte del magnetismo del núcleo se mantiene. Este efecto es llamado magnetismo residual. Debido a que la fuente de excitación que magnetiza el núcleo del transformador es alterna, el campo de magnetización del núcleo también es alterno. Esto ocasiona que el núcleo del transformador se magnetice en el semiciclo positivo y se desmagnetice en el semiciclo negativo. La magnetización y desmagnetización del núcleo se produce por caminos diferentes debido al magnetismo residual. El camino por donde se magnetiza y desmagnetiza el material se llama bucle de histéresis y puede verse en la figura 3-20.

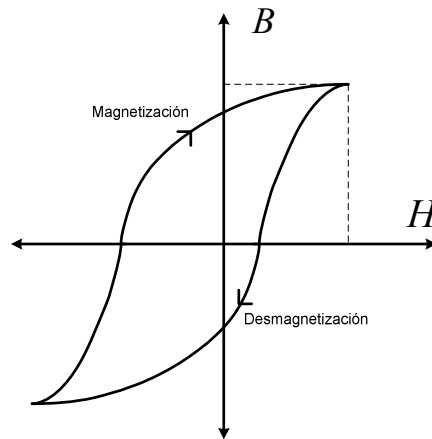


Figura 3-20. Bucle de histéresis de los materiales ferromagnéticos.

La magnetización y desmagnetización permanente del núcleo provoca pérdidas de potencia que calientan el núcleo. La pérdida de potencia provocada por la histéresis del núcleo (ΔP_{Hist}) se asocia con el área que encierra el bucle, y con la rapidez con la cual se magnetiza y desmagnetiza el material. El área que encierra el bucle depende a su vez de las características del material magnético utilizado en el núcleo y de la magnitud de la tensión de la fuente de excitación. La rapidez de la magnetización depende de la frecuencia de la fuente de excitación. En este análisis solo se tendrá en cuenta la componente fundamental para el cálculo de ΔP_{Hist} , ya que el efecto de las componentes armónicas en ΔP_{Hist} es prácticamente despreciable [57]. De acuerdo a lo anterior y según estudios presentados por [57], las pérdidas por histéresis magnética provocada por la componente fundamental (ΔP_{Hist1}) pueden ser calculadas mediante la siguiente expresión:

$$\Delta P_{Hist1} = K_s B^{1.6} f_1 \quad (3.31)$$

donde:

K_s : es el coeficiente de Steinmetz que depende del tipo de núcleo.

B : es el valor pico de la inducción magnética que depende de la amplitud de la tensión de la fuente de excitación.

f_1 : es la frecuencia fundamental de la fuente de excitación.

ΔP_{Hist1} depende de las variaciones que tengan la amplitud de la tensión y la frecuencia de fuente de excitación. ΔP_{Hist1} se considera prácticamente constante pues la amplitud de la tensión y frecuencia de la fuente de excitación tienen una variación mínima con el tiempo.

Capítulo 3. Pérdidas y efectos en los sistemas eléctricos provocados por la conexión de cargas ineficientes.

Debido a que ΔP_{Hist1} depende principalmente de la amplitud y de la frecuencia fundamental de la tensión de suministro, ΔP_{Hist1} se puede determinar mediante la prueba de vacío convencional de los transformadores, tal como se realiza en [53]-[54].

La prueba de vacío consiste en alimentar el transformador sin carga a tensión nominal fundamental ($V_{1_p_nominal}$) y medir en el lado primario del transformador, corriente y potencia, tal como se muestra en la figura 3-21.

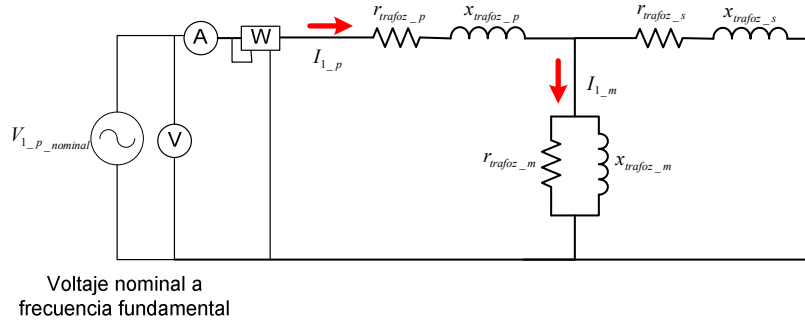


Figura 3-21 Prueba de vacío en los transformadores.

La prueba de vacío es una prueba a tensión nominal fundamental, así que se puede obtener las pérdidas del transformador en vacío fundamentales ($\Delta P_{trafo_no_load1}$). Debido a que el transformador se encuentra en vacío, la corriente del primario (I_{1_p}) es utilizada únicamente para magnetizar el núcleo ($I_{1_p} = I_{1_m}$). La medida de la corriente sirve para calcular las pérdidas en el cobre en vacío ($\Delta P_{Cu_no_load1}$) y las pérdidas provocadas por las corrientes de Eddy cuando el transformador está en vacío y está alimentado a tensión fundamental ($\Delta P_{EC_no_load1}$). I_{1_m} magnetiza el núcleo y provoca las pérdidas por la histéresis del núcleo a tensión fundamental (ΔP_{Hist1}).

I_{1_p} es muy pequeña comparada con la corriente que circula en condiciones nominales por los devanados del transformador, así que, $\Delta P_{Cu_no_load1}$ y $\Delta P_{EC_no_load1}$ son muy pequeñas debido a que son dependientes de I_{1_p} y pueden considerarse despreciables ($\Delta P_{Cu_no_load1} \approx 0$, $\Delta P_{EC_no_load1} \approx 0$). De acuerdo a las anteriores consideraciones ΔP_{Hist1} es la única componente realmente importante en $\Delta P_{trafo_no_load1}$ siendo aproximadamente igual a ΔP_{Hist} . De la misma forma, debido a que los armónicos de tensión no influyen notoriamente en $\Delta P_{trafo_no_load}$, la pérdida de potencia $\Delta P_{trafo_no_load1}$ se aproximará a $\Delta P_{trafo_no_load}$.

$$\Delta P_{trafo_no_load1} \approx \Delta P_{trafo_no_load} \approx \Delta P_{Hist} \approx \Delta P_{Hist1} = K_s B^{1.6} f \quad (3.32)$$

ΔP_{Hist} es prácticamente constante, pues depende principalmente de la tensión de alimentación que también permanece prácticamente constante. ΔP_{Hist} no depende de la corriente de la carga,

así que para cualquier nivel de carga ΔP_{Hist} es invariable. De acuerdo a las consideraciones anteriores, la medida del vatímetro en la prueba de vacío corresponde a ΔP_{Hist} .

Es importante notar que ΔP_{Hist} no depende de la corriente que suministra el transformador a la carga, así que las corrientes demandadas por las carga no provocan variación alguna en ΔP_{Hist} . En este caso, la compensación de Q_1^+ , $S_{U1\#}$, y $S_{eN\#}$ no disminuye las pérdidas provocadas por la histéresis del núcleo magnético.

3.2.2. Pérdida de potencia en el cobre.

Las pérdidas de potencia en el cobre del transformador (ΔP_{Cu}) se deben a que la circulación de corriente por los devanados del transformador provoca calentamientos por efecto Joule. ΔP_{Cu} es la pérdida más significativa producida en el transformador, ya que representa el 60 % de las pérdidas totales [58].

Para obtener ΔP_{Cu} hay que tener en cuenta que la carga del transformador puede estar conformada por cargas lineales y no lineales, equilibradas, y desequilibradas. En este caso los devanados del transformador pueden verse como rollos de cable y modelarse con ayuda del modelo de cable convencional estudiado en la sección anterior. Retomando la ecuación (3.3), ΔP_{Cu} está formada por las pérdidas de potencia provocadas por cada uno de los términos de potencia que la carga demanda: P_1^+ ($\Delta P_{P_1^+}$), Q_1^+ ($\Delta P_{Q_1^+}$), $S_{U1\#}$ ($\Delta P_{S_{U1\#}}$), y $S_{eN\#}$ ($\Delta P_{S_{eN\#}}$).

$$\Delta P_{Cu} = \Delta P_{P_1^+} + \Delta P_{Q_1^+} + \Delta P_{S_{U1\#}} + \Delta P_{S_{eN\#}} \quad (3.33)$$

Para el cálculo de ΔP_{Cu} se deben de medir las corrientes del transformador. Estas corrientes pueden medirse en la prueba con carga del transformador descrita previamente. A continuación se describirán cada una de las pérdidas de potencia de la ecuación (3.33), teniendo en cuenta el transformador trifásico de conexión Δ -Yn de la figura 3-16, con resistencia en el devanado primario por fase (r_{trafo1_p}), y con resistencia en el devanado secundario por fase (r_{trafo1_s}). No se consideran las reactancias ya que no causan pérdidas de potencia:

En sistemas eléctricos ideales con tensiones y corrientes sinusoidales en fase y equilibradas, la carga sólo demanda la corriente activa fundamental de secuencia positiva ($I_{1_s}^{+a}$), la cual está asociada con la transferencia útil de potencia a la carga, cuantificada mediante la potencia activa de secuencia positiva (P_1^+). En este caso, en el lado primario del transformador circula $I_{1_p}^{+a}$. Así que de acuerdo a (3.2), las pérdidas en el cobre ocasionadas por la demanda de P_1^+ ($\Delta P_{P_1^+}$) en los 3 devanados primarios ($\Delta P_{P_1^+_p}$) y en los 3 devanados secundarios ($\Delta P_{P_1^+_s}$) vienen expresadas por:

$$\Delta P_{P_1^+} = \Delta P_{P_1^+_p} + \Delta P_{P_1^+_s} = 3(I_{1_p}^{+a})^2 r_{trafo1_p} + 3(I_{1_s}^{+a})^2 r_{trafo1_s} \quad (3.34)$$

Capítulo 3. Pérdidas y efectos en los sistemas eléctricos provocados por la conexión de cargas ineficientes.

En el caso de que la carga demande potencia reactiva de secuencia positiva (Q_1^+), se establece la corriente reactiva fundamental de secuencia positiva, I_{1-s}^{+r} en el lado secundario e I_{1-p}^{+r} en el lado primario. De acuerdo a (3.8), las pérdidas en el cobre provocadas por Q_1^+ ($\Delta P_{Q_1^+}$) en los 3 devanados primarios ($\Delta P_{Q_1^+-p}$) y en los 3 devanados secundarios ($\Delta P_{Q_1^+-s}$) están dadas por:

$$\Delta P_{Q_1^+} = \Delta P_{Q_1^+-p} + \Delta P_{Q_1^+-s} = 3(I_{1-p}^{+r})^2 r_{\text{trafo1}_-p} + 3(I_{1-s}^{+r})^2 r_{\text{trafo1}_-s} \quad (3.35)$$

En el caso de que la carga sea desequilibrada ($S_{U1\#}$), por los devanados del transformador circulan la corriente fundamental de secuencia negativa y la corriente fundamental de secuencia cero. I_{1-s}^- e I_{1-s}^0 en el lado secundario, e I_{1-p}^- e I_{1-p}^0 en el lado primario. De acuerdo a (3.14), las pérdidas en el cobre provocadas por $S_{U1\#}$ ($\Delta P_{S_{U1\#}}$) en los 3 devanados primarios ($\Delta P_{S_{U1\#}-p}$) y en los 3 devanados secundarios ($\Delta P_{S_{U1\#}-s}$) están dadas por:

$$\begin{aligned} \Delta P_{S_{U1\#}} &= \Delta P_{S_{U1\#}-p} + \Delta P_{S_{U1\#}-s} \\ \Delta P_{S_{U1\#}-p} &= 3 \left[(I_{1-p}^-)^2 + (I_{1-p}^0)^2 \right] r_{\text{trafo1}_-p} \\ \Delta P_{S_{U1\#}-s} &= 3 \left[(I_{1-s}^-)^2 + (I_{1-s}^0)^2 \right] r_{\text{trafo1}_-s} \end{aligned} \quad (3.36)$$

En el caso de que la carga sea no lineal ($S_{eN\#}$), por los devanados del transformador circula la corriente no fundamental (I_H), I_{H-s} en el lado secundario e I_{H-p} en el lado primario. De acuerdo a (3.19), las pérdidas en el cobre provocadas por $S_{eN\#}$ ($\Delta P_{S_{eN\#}}$) en los 3 devanados primarios ($\Delta P_{S_{eN\#}-p}$) y en los 3 devanados secundarios ($\Delta P_{S_{eN\#}-s}$) están dadas por:

$$\Delta P_{S_{eN\#}} = \Delta P_{S_{eN\#}-p} + \Delta P_{S_{eN\#}-s} = 3(I_{H-p})^2 r_{\text{trafo1}_-p} + 3(I_{H-s})^2 r_{\text{trafo1}_-s} \quad (3.37)$$

Debido a que I_{H-s} e I_{H-p} pueden descomponerse en armónicos de secuencia positiva, negativa y cero, $\Delta P_{S_{eN\#}}$ puede expresarse de la siguiente manera:

$$\begin{aligned} \Delta P_{S_{eN\#}} &= \Delta P_{S_{eN\#}-p} + \Delta P_{S_{eN\#}-s} \\ \Delta P_{S_{eN\#}-p} &= 3 \left[(I_{H-p}^+)^2 + 3(I_{H-p}^-)^2 + 3(I_{H-p}^0)^2 \right] r_{\text{trafo1}_-p} \\ \Delta P_{S_{eN\#}-s} &= 3 \left[(I_{H-s}^+)^2 + 3(I_{H-s}^-)^2 + 3(I_{H-s}^0)^2 \right] r_{\text{trafo1}_-s} \end{aligned} \quad (3.38)$$

En resumen las pérdidas en el cobre en el devanado primario (ΔP_{Cu_p}), están dadas por:

$$\begin{aligned} \Delta P_{Cu_p} &= \Delta P_{P_1^+} + \Delta P_{Q_1^+} + \Delta P_{S_{U1\#}-p} + \Delta P_{S_{eN\#}-p} \\ \Delta P_{Cu_p} &= 3 \left[(I_{1-p}^{+a})^2 + (I_{1-p}^{+r})^2 + (I_{1-p}^-)^2 + (I_{1-p}^0)^2 + (I_{H-p}^+)^2 + (I_{H-p}^-)^2 + (I_{H-p}^0)^2 \right] r_{\text{trafo1}_-p} \end{aligned} \quad (3.39)$$

Similarmente, las pérdidas en el cobre en el devanado secundario (ΔP_{Cu_s}), están dadas por:

$$\Delta P_{Cu_s} = \Delta P_{P1_s} + \Delta P_{Q1_s} + \Delta P_{S_{U1\#}_s} + \Delta P_{S_{eN\#}_s} \quad (3.40)$$

$$\Delta P_{Cu_s} = 3 \left[(I_{1_s}^{+a})^2 + (I_{1_s}^{+r})^2 + (I_{1_s}^{-})^2 + (I_{1_s}^0)^2 + (I_{H_s}^+)^2 + (I_{H_s}^-)^2 + (I_{H_s}^0)^2 \right] r_{trafo1_s}$$

En las expresiones (3.39) y (3.40) cada corriente demandada por la carga está elevada al cuadrado y multiplicada por un factor constante, esto conlleva a que iguales valores rms de corrientes en la carga ocasionan iguales pérdidas en el cobre en los devanados del transformador. Desde el punto de vista del compensador selectivo, a iguales valores de corriente rms, resulta indiferente compensar primero Q_1^+ , $S_{U1\#}$, ó $S_{eN\#}$.

3.2.3. Pérdida de potencia provocada por las corrientes de Eddy en los devanados del transformador.

Las corrientes de Eddy aparecen cuando un conductor atraviesa un campo magnético variable, o viceversa. El movimiento relativo causa una circulación de electrones, o corriente inducida dentro del conductor. Estas corrientes circulares crean electroimanes con campos magnéticos que se oponen al efecto del campo magnético aplicado. Cuanto más fuerte sea el campo magnético aplicado, o mayor la conductividad del conductor, o mayor la velocidad relativa de movimiento, mayores serán las corrientes de Eddy.

En los núcleos de bobinas y transformadores se generan tensiones inducidas debido a las variaciones de flujo magnético a que se someten aquellos núcleos. Estas tensiones inducidas son causa de que aparezcan corrientes parásitas en el núcleo (corrientes de Eddy), las cuales provocan calentamiento y disminuyen la eficiencia eléctrica del transformador.

Cuando un conductor está inmerso en un campo magnético senoidal alterno, tal como se representa en la figura 3-22, la intensidad instantánea de campo magnético ($H(t)$) está dada por la expresión:

$$H(t) = \sqrt{2}H \text{ sen}(h\omega_1 t) \quad (3.41)$$

donde, H es el valor rms de la intensidad de campo magnético en (A/m), h es el orden del armónico, y ω_1 es la frecuencia angular fundamental en (rad/s) con $\omega_1=2\pi f_1$.

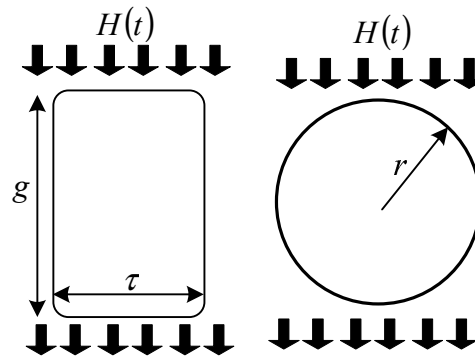


Figura 3-22. Conductor rectangular (izquierda), conductor circular (derecha) inmersos en un campo magnético alterno.

La pérdida de potencia provocada por las corrientes de Eddy (ΔP_{EC}) está cuantificada en [59] mediante la expresión:

$$\Delta P_{EC} = C_1 h^2 f_1^2 H^2 \quad (3.42)$$

Siendo, C_1 una constante que depende de las propiedades del conductor (resistividad (ρ) y permeabilidad magnética (μ_0)), y de la geometría o forma del conductor ancho (τ) y largo (g) para conductores rectangulares, ó radio (r) para conductores circulares.

Para estimar H es posible usar la ley de Ampere-Maxwell:

$$\oint H \cdot dl = N \cdot I_{z_s} \quad (3.43)$$

donde:

dl : es el diferencial de longitud de la curva cerrada (amperiana).

N : es el número de espiras.

I_{z_s} : es la corriente rms de la carga del transformador de cada fase.

H es común a los dos devanados del transformador, así que su cálculo puede ser realizado de forma indiferente con la corriente del devanado primario o con la corriente del devanado secundario. Se eligió el uso de I_{z_s} para el cálculo de H ya que I_{z_s} es la corriente de la carga que contiene componentes eficiente e ineficientes de corriente.

La forma de la amperiana depende de la distribución de los conductores de la bobina o bobinas que componen el transformador. Debido a la complejidad para obtener H se suele usar software basado en elementos finitos para su cálculo [60]. En esta tesis encontrar el campo magnético se

Capítulo 3. Pérdidas y efectos en los sistemas eléctricos provocados por la conexión de cargas ineficientes.

sale de los objetivos, así que se simplificará el trabajo enunciando que H es proporcional a la corriente rms de la carga del transformador (I_{z_s}) [60]:

$$H = C_2 I_{z_s} \quad (3.44)$$

C_2 corresponde a la constante que depende de la distribución o forma del bobinado y del número de espiras de cada bobina del transformador.

Llevando la ecuación (3.44) a la ecuación (3.42) y simplificando las constantes ($C_3=C_1 \cdot C_2$) es posible calcular ΔP_{EC} :

$$\Delta P_{EC} = C_3 h^2 I_{z_s}^2 \quad (3.45)$$

ΔP_{EC} es proporcional al cuadrado de la corriente rms de la carga, y proporcional al cuadrado de la frecuencia, por lo que es necesario medir las componentes armónicas de la corriente. Teniendo en cuenta la contribución de todas las componentes de la corriente y la contribución de las tres fases, ΔP_{EC} está dada por:

$$\Delta P_{EC} = C_3 \sum_{z=a,b,c} \left(\sum_{h=1}^{\infty} h^2 I_{zh_s}^2 \right) \quad (3.46)$$

ΔP_{EC} provoca calentamientos que pueden llegar a ser excesivos en los devanados y núcleo del transformador cuando existen armónicos de corriente [56].

ΔP_{EC} es expresada en términos de ΔP_{EC1} e I_{1_s} tal como lo propone [61]. ΔP_{EC1} es la pérdida de potencia provocada por las corrientes de Eddy cuando el transformador sólo suministra corriente fundamental:

$$\Delta P_{EC} = \Delta P_{EC1} \sum_{h=1}^{\infty} h^2 \left(\frac{I_{h_s}^2}{I_{1_s}^2} \right) \quad (3.47)$$

Se han publicado diversos métodos para medir o calcular ΔP_{EC1} [61]-[63]. De acuerdo con [63] ΔP_{EC1} puede ser calculado fácilmente en función de la pérdida de potencia en el cobre provocada por la corriente rms fundamental de cada fase en el devanado secundario del transformador, obteniéndose mediante la siguiente expresión:

$$\Delta P_{EC1} = \sum_{z=a,b,c} (I_{z1_s}^2 r_{trajol_s}) \cdot m_E^2 \cdot k_f \quad (3.48)$$

donde, m_E es el número de capas del transformador y k_f es un parámetro que depende de:

d : diámetro del cable.

n : número de vueltas por capa.

Capítulo 3. Pérdidas y efectos en los sistemas eléctricos provocados por la conexión de cargas ineficientes.

- w : ancho de la bobina.
 f_1 : frecuencia fundamental.
 ρ : resistividad del conductor.

k_{ff} puede calcularse a partir de la figura 3-23 para diferentes números de capas y para una aproximación en baja frecuencia (*LF* low frequency).

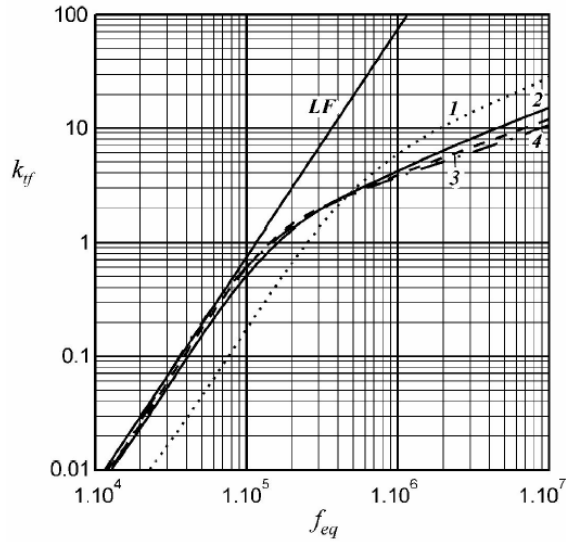


Figura 3-23 Factor k_{ff} para un transformador con $d=0.5$ mm, $\rho=23 \times 10^{-9}$ figura obtenida de [63].

La frecuencia equivalente (f_{eq}) de la figura 3-23 para el cálculo de k_{ff} normaliza la frecuencia en la curva para la frecuencia fundamental (f_1), diámetro del conductor (d), y la resistividad del conductor (ρ), mediante la siguiente expresión:

$$f_{eq} = f_1 \left(\frac{d}{0.5} \right)^2 \left(\frac{23 \times 10^{-9}}{\rho} \right) \quad (3.49)$$

ΔP_{EC} puede ser dividido en ΔP_{EC1} y en las pérdidas de potencia provocadas por las corrientes de Eddy cuando el transformador suministra corrientes no fundamentales (ΔP_{ECH}):

$$\Delta P_{EC} = \Delta P_{EC1} + \Delta P_{ECH} = C_3 \sum_{z=a,b,c} I_{z1-s}^2 + \sum_{z=a,b,c} \left(\sum_{h=2}^{\infty} h^2 I_{zh-s}^2 \right) \quad (3.50)$$

De acuerdo a (3.47) y (3.48), ΔP_{EC} depende de la corriente de la carga del transformador. Para obtener una mejor aproximación de ΔP_{EC} hay que tener en cuenta que la carga del

transformador puede estar conformada por cargas no lineales, desequilibradas, y reactivas. ΔP_{EC} está compuesta por:

- Las pérdidas de Eddy debido a la demanda de P_1^+ ($\Delta P_{EC_P_1^+}$). $\Delta P_{EC_P_1^+}$ se debe a la circulación de $I_{1_s}^{+a}$ por los devanados del transformador y su expresión está dada por:

$$\Delta P_{EC_P_1^+} = 3 \left((I_{1_s}^{+a})^2 r_{\text{trafo1}_s} \right) \cdot m_E^2 \cdot k_{\text{ef}} \quad (3.51)$$

- Las pérdidas de Eddy debido a la demanda de Q_1^+ ($\Delta P_{EC_Q_1^+}$). $\Delta P_{EC_Q_1^+}$ se debe a la circulación de $I_{1_s}^{+r}$ por los devanados del transformador y su expresión está dada por:

$$\Delta P_{EC_Q_1^+} = 3 \left((I_{1_s}^{+r})^2 r_{\text{trafo1}_s} \right) \cdot m_E^2 \cdot k_{\text{ef}} \quad (3.52)$$

- Las pérdidas de Eddy debido a la demanda de $S_{U1\#}$ ($\Delta P_{EC_S_{U1\#}}$). $\Delta P_{EC_S_{U1\#}}$ se debe a la circulación de $I_{1_s}^-$ e $I_{1_s}^0$ por los devanados del transformador y su expresión está dada por:

$$\Delta P_{EC_S_{U1\#}} = 3 \left((I_{1_s}^-)^2 r_{\text{trafo1}_s} \right) \cdot m_E^2 \cdot k_{\text{ef}} + 3 \left((I_{1_s}^0)^2 r_{\text{trafo1}_s} \right) \cdot m_E^2 \cdot k_{\text{ef}} \quad (3.53)$$

- Las pérdidas de Eddy debido a la demanda de $S_{eN\#}$ ($\Delta P_{EC_S_{eN\#}}$). $\Delta P_{EC_S_{eN\#}}$ se debe a la circulación de I_{h_s} por los devanados del transformador y su expresión está dada por:

$$\Delta P_{EC_S_{eN\#}} = \Delta P_{EC1} \sum_{h=2} h^2 \left(\frac{I_{h_s}}{I_{1_s}} \right)^2 \quad (3.54)$$

I_{h_s} está compuesta por armónicos de secuencia positiva, negativa y cero, por lo que $\Delta P_{EC_S_{eN\#}}$ puede expresarse de la siguiente manera:

$$\Delta P_{EC_S_{eN\#}} = \Delta P_{EC1} \sum_{\substack{h=3n+1 \\ n=1,2,3,\dots,\infty}} h^2 \left(\frac{I_{h_s}^+}{I_{1_s}} \right)^2 + \Delta P_{EC1} \sum_{\substack{h=3n+2 \\ n=0,1,2,\dots,\infty}} h^2 \left(\frac{I_{h_s}^-}{I_{1_s}} \right)^2 + \Delta P_{EC1} \sum_{\substack{h=3n+3 \\ n=0,1,2,\dots,\infty}} h^2 \left(\frac{I_{h_s}^0}{I_{1_s}} \right)^2 \quad (3.55)$$

A iguales valores de corriente rms en la carga, las pérdidas de Eddy asociadas con Q_1^+ y $S_{U1\#}$ provocan los mismos efectos, esto se debe a que $\Delta P_{EC_Q_1^+}$ y $\Delta P_{EC_S_{U1\#}}$ están multiplicados por las mismas constantes. Las pérdidas de Eddy asociadas con $S_{eN\#}$ ocasionan mayores efectos debido a que $\Delta P_{EC_S_{eN\#}}$ es proporcional al cuadrado de la frecuencia ó lo que es lo mismo proporcional al cuadrado del orden del armónico (h), y por lo tanto, a medida que aumenta h aumenta $\Delta P_{EC_S_{eN\#}}$. También se observa que la secuencia de rotación de los armónicos, representados en la ecuación (3.55), no influye en el aumento o disminución de $\Delta P_{EC_S_{eN\#}}$, ya

que las pérdidas provocadas por las corrientes no fundamentales de secuencia positiva, negativa y cero están multiplicadas por las mismas constantes.

3.2.4. Pérdida de potencia provocada por las corrientes de Eddy en la carcasa y alrededores.

La pérdida potencia ΔP_{OSL} es la pérdida provocada por las corrientes de Eddy que se inducen en la carcasa, radiador, abrazaderas y otros herrajes metálicos del transformador. ΔP_{OSL} al ser provocada por corrientes de Eddy también se incrementa con el cuadrado de la corriente, pero no se incrementan con el cuadrado de la frecuencia como ΔP_{EC} . Estudios de fabricantes e investigadores han demostrado que las pérdidas de potencia en la carcasa varían con la frecuencia en un factor exponencial igual o inferior a 0.8 [55]-[56]. ΔP_{OSL} en transformadores con aislamiento seco es tan pequeña que puede considerarse despreciable. En cambio, en transformadores con aislamiento líquido, ΔP_{OSL} tiene valores mayores y ocasiona el aumento de temperatura en la carcasa y alrededores del transformador, en este caso ΔP_{OSL} debe ser estimada con mayor cuidado. En [53] se propone una expresión para calcular ΔP_{OSL} en transformadores con aislamiento líquido es:

$$\Delta P_{OSL} = \Delta P_{OSL1} \sum_{h=1} H^{0.8} \left(\frac{I_h}{I_{1_s}} \right)^2 \quad (3.56)$$

donde, ΔP_{OSL1} es la pérdida de potencia en la carcasa provocada a frecuencia fundamental y corriente nominal. De acuerdo a [53] ΔP_{OSL1} puede obtenerse restando a la pérdida de potencia medida en la prueba de cortocircuito (ΔP_{trafo_short}), las pérdidas en el cobre a corriente nominal fundamental ($\Delta P_{Cu1_nominal}$), las pérdidas de potencia producida por la corriente de Eddy cuando el transformador suministra solo corriente nominal fundamental ($\Delta P_{EC1_nominal}$) medida en la prueba de vacío, y las pérdidas producidas por las histéresis del transformador (ΔP_{Hist}) medidas en la prueba de vacío:

$$\Delta P_{OSL1} = \Delta P_{trafo_short} - \Delta P_{Cu1_nominal} - \Delta P_{EC1_nominal} - \Delta P_{Hist} \quad (3.57)$$

La prueba de cortocircuito consiste en cortocircuitar el devanado secundario del transformador y alimentar el devanado primario a una tensión baja (V_{1_p}), de tal modo que se establezca la corriente nominal fundamental en los devanados del transformador ($I_{1_p_nominal}$ en el devanado primario e $I_{1_s_nominal}$ en el devanado secundario). En esta prueba se debe medir en el lado primario del transformador voltaje, corriente y potencia, mientras que en el lado secundario, se debe medir la corriente de cortocircuito, tal como se muestra en la figura 3-24.

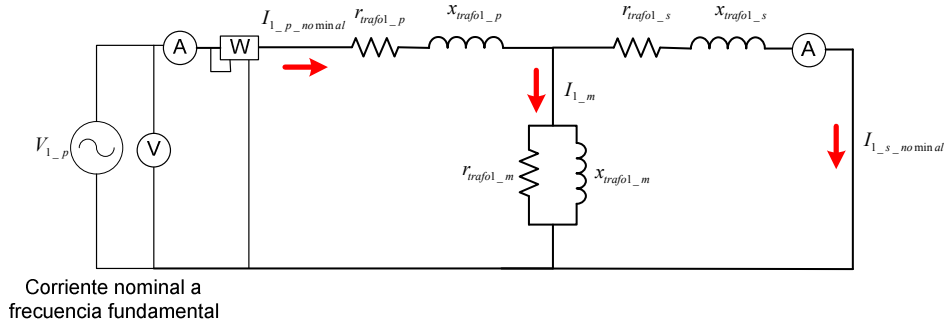


Figura 3-24 Prueba de cortocircuito de los transformadores.

$I_{1_p_nominal}$ está compuesta por la corriente que magnetiza el núcleo (I_{1_m}) y la corriente de cortocircuito del secundario del transformador ($I_{1_s_nominal}$). La medida de la tensión sirve para controlar la tensión de alimentación de forma segura y evitar que la corriente del transformador sea muy alta. La medida de la corriente en los devanados sirve para calcular las pérdidas en el cobre y las pérdidas provocadas por las corrientes de Eddy a corriente nominal fundamental ($\Delta P_{Cu1_nominal}$ y $\Delta P_{EC1_nominal}$ respectivamente). $\Delta P_{Cu1_nominal}$ puede hallarse con la ecuación (3.33) para calcular las pérdidas en el cobre. $\Delta P_{EC1_nominal}$ puede hallarse con la ecuación (3.48) para calcular las pérdidas debido a las corrientes de Eddy. ΔP_{Hist} puede obtenerse mediante la prueba de vacío de los transformadores a tensión nominal fundamental, ecuación (3.32). La medida del vatímetro registra las pérdidas de potencia fundamentales del transformador en cortocircuito (ΔP_{trafo_short}), el subíndice “1” es omitido en ΔP_{trafo_short} , ya que la prueba de cortocircuito siempre se hace a tensión y corriente fundamental.

ΔP_{OSL} al depender de la corriente de la carga está compuesta por:

- Las pérdidas en la carcasa debido a la demanda de P_1^+ ($\Delta P_{OSL_P_1^+}$). $\Delta P_{OSL_P_1^+}$ se debe a la circulación de $I_{1_s}^{+a}$ por los devanados del transformador y su expresión está dada por:

$$\Delta P_{OSL_P_1^+} = \Delta P_{OSL1} \sum_{h=1} h^{0.8} \left(\frac{I_{1_s}^{+a}}{I_{1_s_nominal}} \right)^2 \quad (3.58)$$

- Las pérdidas en la carcasa debido a la demanda de Q_1^+ ($\Delta P_{OSL_Q_1^+}$). $\Delta P_{OSL_Q_1^+}$ se debe a la circulación de $I_{1_s}^{+r}$ por los devanados del transformador y su expresión está dada por:

$$\Delta P_{OSL_Q_1^+} = \Delta P_{OSL1} \sum_{h=1} h^{0.8} \left(\frac{I_{1_s}^{+r}}{I_{1_s_nominal}} \right)^2 \quad (3.59)$$

- Las pérdidas en la carcasa debido a la demanda de $S_{U1\#}$ ($\Delta P_{OSL_S_{U1\#}}$). $\Delta P_{OSL_S_{U1\#}}$ se debe a la circulación de $I_{1_s}^-$ e $I_{1_s}^0$ por los devanados del transformador y su expresión está dada por:

$$\Delta P_{OSL_S_{U1\#}} = \Delta P_{OSL1} \left(\sum_{h=1} h^{0.8} \left(\frac{I_{1_s}^-}{I_{1_s_nominal}} \right)^2 + \sum_{h=1} h^{0.8} \left(\frac{I_{1_s}^0}{I_{1_s_nominal}} \right)^2 \right) \quad (3.60)$$

- Las pérdidas en la carcasa debido a la demanda de $S_{eN\#}$ ($\Delta P_{OSL_S_{eN\#}}$). $\Delta P_{OSL_S_{eN\#}}$ se debe a la circulación de I_{h_s} por los devanados del transformador y su expresión está dada por:

$$\Delta P_{OSL_S_{eN\#}} = \Delta P_{OSL1} \sum_{h=1} h^{0.8} \left(\frac{I_{h_s}}{I_{1_s_nominal}} \right)^2 \quad (3.61)$$

I_{h_s} puede descomponerse en armónicos de secuencia positiva, negativa y cero, de forma que $\Delta P_{OSL_S_{eN\#}}$ puede expresarse de la siguiente manera:

$$\Delta P_{OSL_S_{eN\#}} = \Delta P_{OSL1} \sum_{\substack{h=3n+1 \\ n=1,2,3,\dots,\infty}} h^{0.8} \left(\frac{I_{h_s}^+}{I_{1_s_nominal}} \right)^2 + \Delta P_{OSL1} \sum_{\substack{h=3n+2 \\ n=0,1,2,\dots,\infty}} h^{0.8} \left(\frac{I_{h_s}^-}{I_{1_s_nominal}} \right)^2 + \Delta P_{OSL1} \sum_{\substack{h=3n+3 \\ n=0,1,2,\dots,\infty}} h^{0.8} \left(\frac{I_{h_s}^0}{I_{1_s_nominal}} \right)^2 \quad (3.62)$$

De acuerdo a las expresiones (3.58)-(3.62), ΔP_{OSL} depende de la corriente demandada por la carga, de forma que, a medida que se incrementa la corriente de la carga se incrementa ΔP_{OSL} . En las expresiones de $\Delta P_{OSL_P_1^+}$, $\Delta P_{OSL_Q_1^+}$, $\Delta P_{OSL_S_{U1\#}}$, y $\Delta P_{OSL_S_{eN\#}}$ están multiplicadas por las mismas constantes. $\Delta P_{OSL_P_1^+}$, $\Delta P_{OSL_Q_1^+}$, $\Delta P_{OSL_S_{U1\#}}$, y $\Delta P_{OSL_S_{eN\#}}$ también varían con la frecuencia en un factor exponencial de 0.8, así que cuanto mayor sea el orden del armónico “h” menor es el término “ $h^{0.8}$ ” en las ecuaciones (3.58)-(3.62) y por lo tanto menor es el valor de ΔP_{OSL} para dichas componentes. En este caso las pérdidas de potencia en la carcasa del transformador son mayores cuando la carga demanda corriente fundamental. A iguales valores de corriente rms para cada una de las corrientes que demanda la carga, $\Delta P_{OSL_P_1^+}$, $\Delta P_{OSL_Q_1^+}$, y $\Delta P_{OSL_S_{U1\#}}$ son mayores con respecto a $\Delta P_{OSL_S_{eN\#}}$. La inducción de corrientes de Eddy en la carcasa y alrededores disminuye cuando la frecuencia de las corrientes de la carga aumenta, y por eso la componente fundamental de la corriente relacionada con las potencias P_1^+ , Q_1^+ , y $S_{U1\#}$ provocan mayores pérdidas.

3.2.5. Resumen de las pérdidas de potencia en transformadores.

De acuerdo a lo expuesto en las secciones anteriores ΔP_{Irafo} se puede descomponer de la siguiente manera:

$$\Delta P_{\text{trafo}} = \Delta P_{\text{Hist}} + \Delta P_{\text{Cu}} + \Delta P_{\text{EC}} + \Delta P_{\text{OSL}} \quad (3.63)$$

donde:

- ΔP_{Hist} es provocada debido a la magnetización y desmagnetización del núcleo y es considerada constante ya que depende de la tensión y frecuencia de alimentación del transformador. ΔP_{Hist} no depende de las potencias ineficientes demandadas por la carga.
- ΔP_{Cu} es provocada en los devanados del transformador tiene en cuenta el efecto piel, y el efecto de proximidad, está relacionada directamente con la corriente de carga y todas las ineficiencias de potencia la afectan en la misma medida. ΔP_{Cu} varía en igual medida ante la demanda de las diferentes potencias ineficientes de la carga.
- ΔP_{EC} es provocada por las corrientes de Eddy en los devanados del transformador y se incrementa significativamente cuando la carga demanda $S_{eN\#}$, ya que, ΔP_{EC} es proporcional al cuadrado de la corriente y al cuadrado de la frecuencia. ΔP_{EC} aparece debido a la existencia de las corrientes de Eddy inducidas en el núcleo y devanados del transformador.
- ΔP_{OSL} es la pérdida ocasionada por las corrientes de Eddy inducida en la carcasa y alrededores del transformador y se incrementa cuando la carga demanda Q_1^+ y $S_{U1\#}$, ya que, ΔP_{OSL} disminuye a medida que aumenta la frecuencia. ΔP_{OSL} es provocada por las corrientes de Eddy inducidas en la carcasa y alrededores. La inducción por corrientes de Eddy es mayor en los lugares cercanos a la fuente de excitación. La fuente de excitación de las corrientes de Eddy son los devanados del transformador, por lo que, las corrientes de Eddy inducidas son mayores en el núcleo y devanados que en la carcasa y alrededores.

Debido a las anteriores consideraciones el efecto de ΔP_{EC} es mayor que el efecto producido por ΔP_{OSL} . ΔP_{EC} es afectada en mayor medida cuando la carga demanda $S_{eN\#}$. ΔP_{OSL} es afectada en mayor medida cuando la carga demanda Q_1^+ y $S_{U1\#}$.

3.3. Pérdidas en máquinas rotativas y otros efectos provocados por la conexión de cargas ineficientes.

Las máquinas rotativas son utilizadas para transformar energía eléctrica en energía mecánica o viceversa. Están clasificadas en motores y generadores eléctricos. Los motores eléctricos convierten energía eléctrica en energía mecánica y se utilizan principalmente en procesos que requieren movimiento. Los generadores eléctricos convierten energía mecánica en energía eléctrica y se utilizan para generar la energía eléctrica que actualmente se consume en las ciudades e industrias. Dependiendo de la conexión las máquinas rotativas pueden funcionar como motores o como generadores, la diferencia más relevante que tienen es el sentido del flujo de la potencia. En la tesis, por convención, los generadores suministran potencia al sistema eléctrico y los motores absorben o demandan potencia del sistema eléctrico. Debido a la alta simetría en los devanados de las máquinas eléctricas. Las máquinas eléctricas estudiadas en la tesis son las máquinas trifásicas que tienen conexión a 3 hilos sin neutro. A continuación se describirán brevemente algunas generalidades de los motores y generadores eléctricos con el objetivo de analizar las pérdidas y los efectos que se producen en las máquinas rotativas.

Generalidades de los motores eléctricos: los motores eléctricos convierten energía eléctrica en energía mecánica. Los motores están compuestos por dos devanados acoplados magnéticamente a través de un entrehierro de aire. Uno de los devanados es fijo o sin movimiento (estator) y otro de los devanados es móvil (rotor). La energía eléctrica que proviene del estator se entrega al rotor en forma de energía mecánica. Los motores se clasifican en motores síncronos y en motores asíncronos o de inducción. Los motores síncronos requieren de una fuente de tensión continua en el rotor para funcionar. Los motores asíncronos o de inducción no requieren fuente de alimentación en el rotor, ya que obtienen la corriente del rotor a través de inducción electromagnética.

El estator generalmente es alimentado con un sistema de tensiones trifásico, el cual genera un campo magnético alterno giratorio. Por el rotor generalmente circulan corrientes eléctricas, conducidas en el caso del motor sincrónico, o inducidas en el caso del motor de inducción. La interacción entre el flujo producido por el estator y la corriente que circula por el rotor produce el movimiento del rotor. El modelo del motor de inducción trifásico por fase puede verse en la figura 3-25a. El modelo del motor sincrónico trifásico por fase puede verse en la figura 3-25b, en el cual:

$r_{estator1}$: es la resistencia del estator por fase.

$x_{estator1}$: es la reactancia del estator por fase.

Capítulo 3. Pérdidas y efectos en los sistemas eléctricos provocados por la conexión de cargas ineficientes.

r_{rotor1} : es la resistencia del rotor.

x_{rotor1} : es la reactancia del rotor.

r_m : es la resistencia que modela el núcleo del transformador por fase.

x_m : es la reactancia que modela el núcleo del transformador por fase.

$I_{z_estator}$: es la corriente rms que circula por el estator de la máquina.

I_{z_rotor} : es la corriente rms que circula por el rotor de la máquina.

I_{z_m} : es la corriente de magnetización del núcleo del transformador.

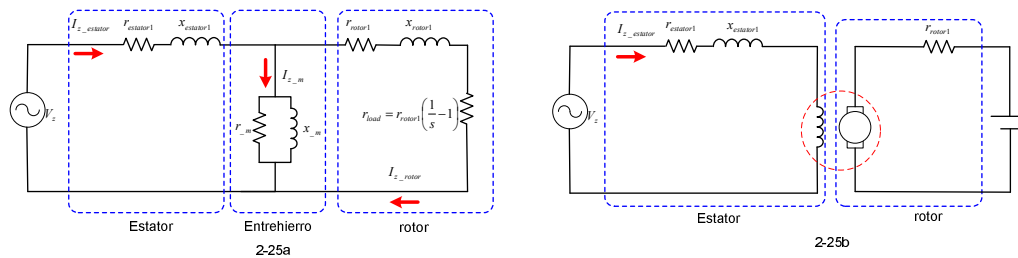


Figura 3-25. Modelo simplificado del motor por fase.

El funcionamiento de los motores depende de la tensión de suministro, así que, cualquier variación en la tensión modifica el comportamiento del motor pudiendo disminuir su vida útil [64]. Variables tales como la corriente, el par y la potencia se alteran ante un eventual cambio en la tensión de alimentación [45]. La asimetría y la distorsión de la tensión de alimentación son las causas más comunes que alteran el comportamiento y disminuyen la vida útil de los motores eléctricos. La asimetría y la distorsión de la tensión de alimentación pueden ser causadas debido a la conexión de variadores de frecuencia [65] y [66], o por cargas no eficientes conectadas en paralelo con los motores.

Los variadores de frecuencia son equipos nuevos que se han venido implementando para variar la velocidad de los motores eléctricos [65], su uso se ha vuelto muy común pues es posible realizar fácilmente acciones de control sobre los motores eléctricos. En los procesos industriales se han podido implementar procesos rápidos y eficientes con ayuda de los variadores de frecuencia. Sin embargo, la instalación de los variadores de frecuencia provoca nuevos problemas, ya que distorsionan la red eléctrica que altera el normal comportamiento de los motores conectados a la misma.

Capítulo 3. Pérdidas y efectos en los sistemas eléctricos provocados por la conexión de cargas ineficientes.

Cuando se conecta el variador de frecuencia al motor, el análisis puede realizarse en dos puntos, ver figura 3-26:

- El punto 1 que corresponde al punto de conexión del motor o aguas abajo del variador de frecuencia.
- El punto 2 que corresponde al punto de conexión del variador de frecuencia en la red eléctrica o aguas arriba del variador.

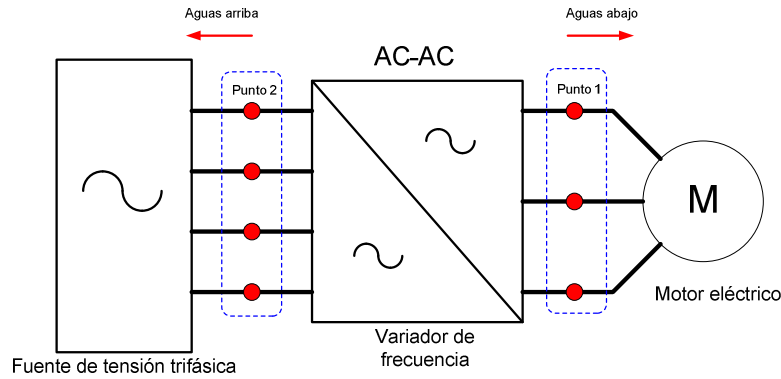


Figura 3-26. Grupo variador de frecuencia – motor.

En el punto 1 de conexión de la figura 3-26, la forma de onda de la tensión que genera el variador de frecuencia no es una senoide perfecta y puede presentar asimetrías de tensión. En este caso la tensión de suministro en bornes del motor puede estar compuesta por V_1^+ , V_1^- , V_1^0 , V_H^+ , V_H^- , y V_H^0 ; El motor podría demandar I_1^+ , I_1^- , I_1^0 , I_H^+ , I_H^- , y I_H^0 y presentar más pérdidas de potencia y efectos nocivos que lo deterioran e influyen en su normal comportamiento. Para contrarrestar este problema es necesario mejorar la modulación que genera la forma de onda del variador de frecuencia [67], o instalar filtros o compensadores serie que mejoren la forma de onda de la tensión en bornes del motor [68]. La solución de este problema no implica la instalación de compensadores activos selectivos, por lo que, en esta tesis no se tratará con mayor detalle.

En el punto 2 de conexión de la figura 3-26, se presentan armónicos de corriente producto de la transformación AC/DC de del variador de frecuencia [65]. En este caso, es mejor modelar al grupo motor-variador como una única carga no lineal. Esta carga no lineal genera problemas en los conductores de alimentación y en los transformadores de distribución como se indicó en los puntos 3.1 y 3.2 de la tesis.

El motor en la mayoría de los casos es considerado como una carga lineal y balanceada. Si es conectado a una tensión fundamental de secuencia positiva (V_1^+) demanda corriente activa fundamental de secuencia positiva (I_1^{+a}) y corriente reactiva fundamental de secuencia positiva

(I_1^{+r}). La demanda de I_1^{+a} o de I_1^{+r} depende de la carga de motor. En vacío I_1^{+r} es máxima e I_1^{+a} es mínima. Con carga nominal, I_1^{+a} es máxima e I_1^{+r} es mínima, bajo esta condición se transfiere la máxima potencia a la carga.

En el caso de que en los bornes del motor, debido a la conexión de cargas no ideales en paralelo con el motor, se establezcan tensiones no ideales V_1^- , V_1^0 , V_H^+ , V_H^- , y V_H^0 , por lo que el motor demanda de la red eléctrica corrientes armónicas y desequilibradas I_1^- , I_1^0 , I_H^+ , I_H^- , y I_H^0 , la circulación de corrientes no eficientes por el motor ocasiona pérdidas de potencia adicionales e influye en su comportamiento. La caída de tensión en los conductores de alimentación distorsiona y vuelven asimétrica la tensión de alimentación tal como se muestra en la figura 3-27.

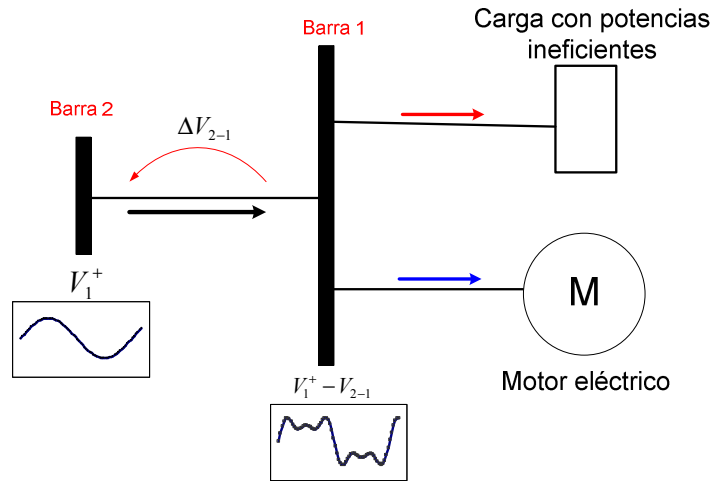


Figura 3-27. Motor conectado en paralelo con carga no ideal.

Generalidades de los generadores eléctricos: los generadores eléctricos convierten energía mecánica en energía eléctrica. Al igual que los motores están compuestos por el estator y el rotor. El estator y el rotor están acoplados magnéticamente a través un entrehierro de aire. La energía mecánica que proviene del rotor se entrega al estator en forma de energía eléctrica. Los generadores se clasifican en generadores síncronos y en generadores asíncronos o de inducción. En la actualidad la mayoría de los generadores instalados para la producción de energía eléctrica son generadores síncronos, así que, en esta sección serán explicados con mayor detalle.

Los generadores síncronos son alimentados en el rotor con una tensión continua. El rotor está acoplado a una turbina la cual pone el rotor a girar. Por el rotor circula una corriente DC que al combinarse con el movimiento del rotor produce un campo magnético giratorio. El campo magnético giratorio induce tensiones en el estator. La forma de onda de las tensiones del

estator depende de las características constructivas de la máquina. Cuando se le conecta la carga en los devanados del estator se transfiere potencia desde el rotor hacia el estator. El modelo del generador síncrono puede verse en la figura 3-28:

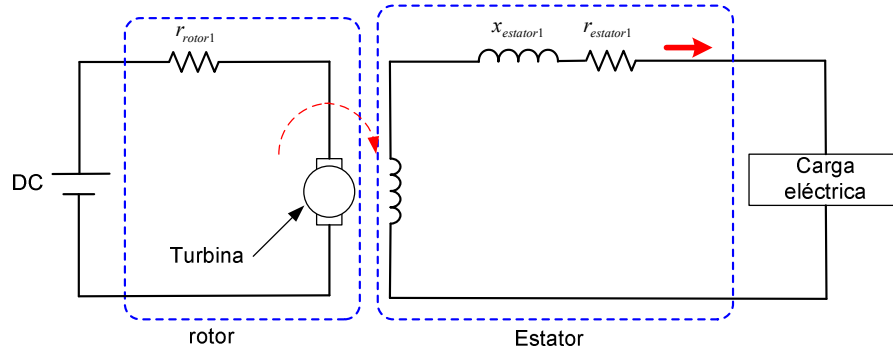


Figura 3-28. Modelo simplificado del generador por fase.

Usualmente los generadores síncronos entregan una forma de onda de tensión senoidal pura y simétrica, sin embargo, existen efectos que la pueden distorsionar y volverla asimétrica.

Los cortocircuitos y asimetrías en los devanados cambian las características constructivas de la máquina, de tal modo que, la máquina genera ondas de tensiones distorsionadas y asimétricas. Al generar tensiones no ideales (V_1^+ , V_1^- , V_1^0 , V_H^+ , V_H^- , y V_H^0), la carga a su vez demanda corrientes no ideales (I_1^+ , I_1^- , I_1^0 , I_H^+ , I_H^- , y I_H^0).

La conexión de cargas no ideales tales como cargas reactivas, no lineales y desequilibradas que demandan I_1^+ , I_1^- , I_1^0 , I_H^+ , I_H^- , y I_H^0 provocan caídas de tensión internas en la máquina, de tal modo que, en bornes de la máquina se establecen tensiones con todo tipo de componentes.

3.3.1. Pérdidas de potencia provocadas en las máquinas rotativas.

Debido a la similitud entre motores y generadores, y a que la diferencia más importante entre un motor y un generador es el sentido del flujo de potencia, es posible describir las pérdidas de potencia de forma genérica para las dos máquinas.

A continuación se estudiará con detalle la forma en la cual tensiones y corrientes no eficientes influyen en la pérdida de potencia y comportamiento de las máquinas rotativas.

De acuerdo a [67] y [69]-[71] las pérdidas de potencia en la máquina ($\Delta P_{maquina}$) se dividen en las pérdidas provocadas por la corriente de la máquina ($\Delta P_{maquina_load}$) y pérdidas internas de la máquina que no dependen de la corriente ($\Delta P_{maquina_noload}$):

$$\Delta P_{maquina} = \Delta P_{maquina_load} + \Delta P_{maquina_noload} \quad (3.64)$$

Capítulo 3. Pérdidas y efectos en los sistemas eléctricos provocados por la conexión de cargas ineficientes.

$\Delta P_{máquina_load}$ se divide en las pérdidas en el cobre (ΔP_{Cu}), en las pérdidas provocadas por las corrientes de Eddy inducidas en los devanados y en el núcleo (ΔP_{EC}), y en las pérdidas provocadas por las corrientes de Eddy inducidas en la carcasa y herrajes metálicos de la máquina (ΔP_{OSL}). Aunque ΔP_{EC} y ΔP_{OSL} son pérdidas provocadas por corrientes de Eddy, sólo a ΔP_{EC} , por su importancia, se le asigna el subíndice “EC” (Eddy Current). A ΔP_{OSL} , que corresponde a otras pérdidas producidas por las corrientes de Eddy, se le asigna el subíndice “OSL” (Other Stray Losses).

$$\Delta P_{máquina_load} = \Delta P_{Cu} + \Delta P_{EC} + \Delta P_{OSL} \quad (3.65)$$

$\Delta P_{máquina_noload}$ se divide en las pérdidas provocadas por la histéresis del núcleo (ΔP_{Hist}), por las pérdidas mecánicas (ΔP_m), por las pérdidas en el cobre en vacío (ΔP_{Cu_noload}) y por las pérdidas provocadas por las corrientes de Eddy en vacío (ΔP_{EC_noload}):

$$\Delta P_{máquina_noload} = \Delta P_{Hist} + \Delta P_m + \Delta P_{Cu_noload} + \Delta P_{EC_noload} \quad (3.66)$$

La división de las pérdidas de potencia en la máquina puede verse en la figura 3-29:

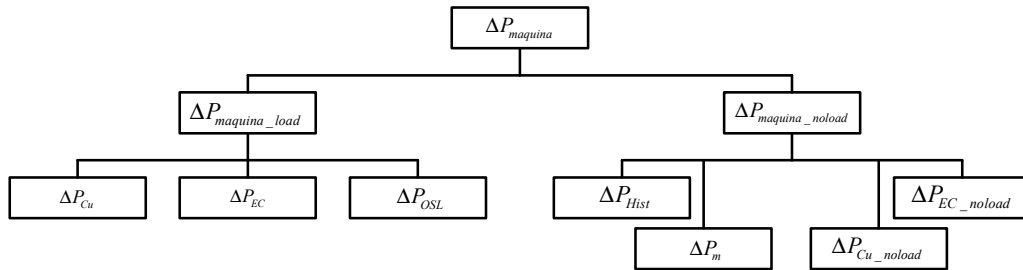


Figura 3-29 División de pérdidas producidas en las máquinas rotativas.

3.3.1.1. Pérdidas de potencia en el cobre provocada por las corrientes que circulan por los devanados del estator y del rotor.

Las pérdidas en el cobre de las máquinas rotativas (ΔP_{Cu}) se deben a la circulación de corriente por el estator y por el rotor. ΔP_{Cu} es una de las pérdidas más significativas en las máquinas ya que representa el 25 % de las pérdidas totales [65]. ΔP_{Cu} en las máquinas rotativas es proporcional al cuadrado de la corriente, a mayor corriente mayores pérdidas en el cobre. ΔP_{Cu} en las máquinas rotativas se dividen en las pérdidas en el cobre del devanado del estator $\Delta P_{Cu_estator}$ y en las pérdidas en el cobre del devanado del rotor ΔP_{Cu_rotor} .

$$\Delta P_{Cu} = \Delta P_{Cu_estator} + \Delta P_{Cu_rotor} \quad (3.67)$$

Para el cálculo de ΔP_{Cu} se debe medir o estimar la corriente de la máquina en el estator y en el rotor. Los bornes y conductores del devanado del estator son accesibles, así que sus corrientes pueden obtenerse por medición directa. Los bornes y conductores del rotor son accesibles

Capítulo 3. Pérdidas y efectos en los sistemas eléctricos provocados por la conexión de cargas ineficientes.

siempre y cuando la máquina tenga rotor devanado con anillos rozantes, en este caso las corrientes del rotor se pueden medir. En el caso de las máquinas de inducción, que no tienen el rotor accesible, la corriente del rotor se puede estimar con ayuda del circuito equivalente de la máquina, ver figuras 3-25b y 3-28. Para obtener el circuito equivalente es necesario realizar las pruebas de vacío y cortocircuito [70] y [72].

Como ya se ha dicho previamente, las máquinas rotativas pueden suministrar o demandar corrientes reactivas, desequilibradas y no lineales. ΔP_{Cu} depende de la corriente de la máquina y está conformada por las pérdidas de potencia provocada por P_1^+ ($\Delta P_{P_1^+}$), Q_1^+ ($\Delta P_{Q_1^+}$), $S_{U1\#}$ ($\Delta P_{S_{U1\#}}$), y $S_{eN\#}$ ($\Delta P_{S_{eN\#}}$).

$$\Delta P_{Cu} = \Delta P_{P_1^+} + \Delta P_{Q_1^+} + \Delta P_{S_{U1\#}} + \Delta P_{S_{eN\#}} \quad (3.68)$$

Los términos de la expresión (3.68) pueden expresarse en términos de la resistencia del estator ($r_{estator1}$), resistencia del rotor (r_{rotor1}), corrientes del estator ($I_{z_estator}$), y corrientes del rotor (I_{z_rotor}).

En sistemas eléctricos ideales con tensiones y corrientes sinusoidales en fase y equilibradas, la máquina suministra o demanda la corriente activa fundamental de secuencia positiva (I_1^{+a} estator), la cual está asociada con la transferencia útil de potencia a la carga o la potencia activa de secuencia positiva (P_1^+). En el rotor se induce I_1^{+a} rotor. De acuerdo a (3.2), las pérdidas en el cobre producida por P_1^+ ($\Delta P_{P_1^+}$) en los 3 devanados del estator ($\Delta P_{P_1^+ \text{ estator}}$) y en los 3 devanados rotor ($\Delta P_{P_1^+ \text{ rotor}}$) están dadas por:

$$\Delta P_{P_1^+} = \Delta P_{P_1^+ \text{ estator}} + \Delta P_{P_1^+ \text{ rotor}} = 3(I_1^{+a} \text{ estator})^2 r_{estator1} + 3(I_1^{+a} \text{ rotor})^2 r_{rotor1} \quad (3.69)$$

En el caso de que la máquina suministre o demande potencia reactiva de secuencia positiva (Q_1^+), se establece la corriente reactiva fundamental de secuencia positiva, I_1^{+r} estator e I_1^{+r} rotor. De acuerdo a (3.8), las pérdidas en el cobre producida por Q_1^+ ($\Delta P_{Q_1^+}$) en los 3 devanados del estator ($\Delta P_{Q_1^+ \text{ estator}}$) y en los 3 devanados del rotor ($\Delta P_{Q_1^+ \text{ rotor}}$) están dadas por:

$$\Delta P_{Q_1^+} = \Delta P_{Q_1^+ \text{ estator}} + \Delta P_{Q_1^+ \text{ rotor}} = 3(I_1^{+r} \text{ estator})^2 r_{estator1} + 3(I_1^{+r} \text{ rotor})^2 r_{rotor1} \quad (3.70)$$

En el caso de que las corrientes que demanda o suministra la máquina contengan desequilibrios ($S_{U1\#}$), por los devanados del estator circula la corriente fundamental de secuencia negativa (I_1^- estator), y la corriente fundamental de secuencia cero (I_1^0 estator). En el rotor se establece la corriente fundamental de secuencia negativa (I_1^- rotor), y la corriente fundamental de secuencia

Capítulo 3. Pérdidas y efectos en los sistemas eléctricos provocados por la conexión de cargas ineficientes.

cero ($I_{1_rotor}^0$). De acuerdo a (3.13), las pérdidas en el cobre producida por $S_{U1\#}$ ($\Delta P_{S_{U1\#}}$) en los 3 devanados del estator ($\Delta P_{S_{U1\#_estator}}$) y en los 3 devanados rotor ($\Delta P_{S_{U1\#_rotor}}$) están dadas por:

$$\begin{aligned}\Delta P_{S_{U1\#}} &= \Delta P_{S_{U1\#_estator}} + \Delta P_{S_{U1\#_rotor}} \\ \Delta P_{S_{U1\#_estator}} &= 3(I_{1_estator}^-)^2 r_{estator1} + 3(I_{1_estator}^0)^2 r_{estator1} \\ \Delta P_{S_{U1\#_rotor}} &= 3(I_{1_rotor}^-)^2 r_{rotor1} + 3(I_{1_rotor}^0)^2 r_{rotor1}\end{aligned}\quad (3.71)$$

En el caso de que la máquina suministre o demande ($S_{eN\#}$), por los devanados del estator circula la corriente no fundamental ($I_{H_estator}$). En el rotor también se establece la corriente no fundamental (I_{H_rotor}). Se considerará $r_{estator1}$ y r_{rotor1} como las resistencias de los devanados para los armónicos de corriente. De acuerdo a (3.19), las pérdidas en el cobre provocadas por la demanda de $S_{eN\#}$ ($\Delta P_{S_{eN\#}}$) en los 3 devanados del estator ($\Delta P_{S_{eN\#_estator}}$) y en los 3 devanados del rotor ($\Delta P_{S_{eN\#_rotor}}$) están dadas por:

$$\Delta P_{S_{eN\#}} = \Delta P_{S_{eN\#_estator}} + \Delta P_{S_{eN\#_rotor}} = 3(I_{H_estator})^2 r_{estator1} + 3(I_{H_rotor})^2 r_{rotor1} \quad (3.72)$$

Debido a que $I_{H_estator}$ e I_{H_rotor} pueden estar compuestos por armónicos de corriente de secuencia positiva, negativa y cero, $\Delta P_{S_{eN\#}}$ puede expresarse de la siguiente manera:

$$\begin{aligned}\Delta P_{S_{eN\#}} &= \Delta P_{S_{eN\#_estator}} + \Delta P_{S_{eN\#_rotor}} \\ \Delta P_{S_{eN\#_estator}} &= 3(I_{H_estator}^+)^2 r_{estator1} + 3(I_{H_estator}^-)^2 r_{estator1} + 3(I_{H_estator}^0)^2 r_{estator1} \\ \Delta P_{S_{eN\#_rotor}} &= 3(I_{H_rotor}^+)^2 r_{rotor1} + 3(I_{H_rotor}^-)^2 r_{rotor1} + 3(I_{H_rotor}^0)^2 r_{rotor1}\end{aligned}\quad (3.73)$$

En resumen las pérdidas en el cobre de los devanados del estator ($\Delta P_{Cu_estator}$), están dadas por:

$$\begin{aligned}\Delta P_{Cu_estator} &= \Delta P_{P_1^+_estator} + \Delta P_{Q_1^+_estator} + \Delta P_{S_{U1\#_estator}} + \Delta P_{S_{eN\#_estator}} \\ \Delta P_{Cu_estator} &= 3 \left[\begin{aligned} &(I_{1_estator}^{+a})^2 + (I_{1_estator}^{+r})^2 + (I_{1_estator}^-)^2 + (I_{1_estator}^0)^2 \\ &+ (I_{H_estator}^+)^2 + (I_{H_estator}^-)^2 + (I_{H_estator}^0)^2 \end{aligned} \right] r_{estator1}\end{aligned}\quad (3.74)$$

Similarmente, las pérdidas en el cobre del devanado del rotor (ΔP_{Cu_rotor}), están dadas por:

$$\begin{aligned}\Delta P_{Cu_rotor} &= \Delta P_{P_1^+_rotor} + \Delta P_{Q_1^+_rotor} + \Delta P_{S_{U1\#_rotor}} + \Delta P_{S_{eN\#_rotor}} \\ \Delta P_{Cu_rotor} &= 3 \left[\begin{aligned} &(I_{1_rotor}^{+a})^2 + (I_{1_rotor}^{+r})^2 + (I_{1_rotor}^-)^2 + (I_{1_rotor}^0)^2 \\ &+ (I_{H_rotor}^+)^2 + (I_{H_rotor}^-)^2 + (I_{H_rotor}^0)^2 \end{aligned} \right] r_{rotor1}\end{aligned}\quad (3.75)$$

En las máquinas síncronas el rotor de la máquina está alimentado con una tensión DC (V_0). En este caso se considera que no existe inducción de corrientes en el rotor. Así que, considerando nulas a $I_{1_rotor}^+$, $I_{1_rotor}^-$, $I_{1_rotor}^0$, $I_{H_rotor}^+$, $I_{H_rotor}^-$, e $I_{H_rotor}^0$. La corriente que circula por el devanado del rotor es DC (I_0) y ΔP_{Cu_rotor} está dada por:

$$\Delta P_{Cu_rotor} = V_0 I_0 \quad (3.76)$$

En este caso, ΔP_{Cu_rotor} no depende de las corrientes suministradas o demandadas por la máquina. En las expresiones (3.74) y (3.75) cada corriente suministrada o demandada por la máquina está elevada al cuadrado y multiplicada por un factor constante, esto conlleva a que iguales valores rms de corrientes producen iguales pérdidas en el cobre en los devanados del estator y del rotor. Para esta situación, con un compensador activo selectivo es indiferente entonces compensar primero Q_1^+ , $S_{U1\#}$, ó $S_{eN\#}$.

Sabiendo que $I_1^{+a}_{estator}$ es la única corriente eficiente que suministra o demanda la máquina y que $I_1^{+a}_{rotor}$ es la única corriente que en condiciones óptimas debería circular por el rotor, en las expresiones (3.74) y (3.75), también puede verse la evidente pérdida de capacidad de potencia que sufre la máquina ante cualquier incremento en las corrientes no eficientes.

3.3.1.2. Pérdida de potencia provocada por las corrientes de Eddy en los núcleos de las máquinas rotativas.

Al igual que en los transformadores eléctricos, en las máquinas rotativas también se presentan pérdidas de potencia provocadas por las corrientes de Eddy (ΔP_{EC}). En este caso las corrientes de Eddy se inducen en los núcleos del estator y del rotor de la máquina. Debido a la rotación de la máquina y que las máquinas eléctricas son estructuras más complejas, es difícil predecir con precisión ΔP_{EC} [73]. La distribución del flujo magnético y la variación del flujo con la rotación de la máquina son factores que deben de tenerse en cuenta para evaluar ΔP_{EC} .

La distribución del flujo magnético en el interior de la máquina no es uniforme, así que ΔP_{EC} no es igual en todos los puntos en los núcleos de los devanados. Calcular con precisión ΔP_{EC} implica evaluar el flujo magnético en los dientes, ranuras, polos y soportes del núcleo. La complejidad de los devanados y las ecuaciones que rigen el funcionamiento de las máquinas rotativas hace que el cálculo del flujo magnético no sea una tarea fácil. Técnicas avanzadas basadas en algoritmos de elementos finitos se pueden utilizar para calcular con buena precisión el flujo magnético en cada punto de la máquina [74], [75].

Los transformadores eléctricos (máquinas sin movimiento) son alimentados mediante un sistema de tensiones trifásico alterno. El sistema de tensiones trifásico alterno produce en el núcleo un campo magnético que induce corrientes de Eddy provocando pérdidas de potencia [59]. Al campo magnético producido en los devanados del transformador de ahora en adelante será llamado campo magnético alterno o campo magnético sin rotación. Las pérdidas de potencia provocadas por la existencia de este campo magnético en los transformadores eléctricos fueron descritas en la sección 3.2.

Las máquinas rotativas también son alimentadas en el estator mediante un sistema de tensiones trifásico alterno. Este sistema de tensiones trifásico alterno produce un campo magnético

Capítulo 3. Pérdidas y efectos en los sistemas eléctricos provocados por la conexión de cargas ineficientes.

alterno similar al campo magnético alterno producido en los transformadores, así que las ecuaciones utilizadas para describir ΔP_{EC} en los transformadores son validas para describir ΔP_{EC} en las máquinas rotativas. Sin embargo, debido a que el funcionamiento intrínseco de la máquina implica su rotación, el campo magnético alterno producido en las máquinas rotativas también es giratorio [73], [76]-[78]. Que un campo magnético sea giratorio implica que existe una variación adicional del flujo magnético con respecto al tiempo. Esta variación adicional provoca corrientes de Eddy de mayor magnitud generando mayores pérdidas de potencia. De acuerdo a lo anterior, ΔP_{EC} en las máquinas rotativas se divide en pérdidas de potencia provocadas por las corrientes de Eddy alternas (ΔP_{EC_ALT}) y en las pérdidas de potencia provocadas por las corrientes de Eddy rotativas (ΔP_{EC_ROT}) [73].

$$\Delta P_{EC} = \Delta P_{EC_ALT} + \Delta P_{EC_ROT} \quad (3.77)$$

ΔP_{EC_ALT} puede calcularse en función de la resistencia y corriente del estator:

$$\Delta P_{EC_ALT} = \Delta P_{EC_P^*} + \Delta P_{EC_Q^*} + \Delta P_{EC_S_{U1\#}} + \Delta P_{EC_S_{eN\#}} \quad (3.78)$$

$$\Delta P_{EC_P^*} = 3 \left((I_{estator1}^{+a})^2 r_{estator1} \right) \cdot m_E^2 \cdot k_{yf} \quad (3.79)$$

$$\Delta P_{EC_Q^*} = 3 \left((I_{estator1}^{+r})^2 r_{estator1} \right) \cdot m_E^2 \cdot k_{yf} \quad (3.80)$$

$$\Delta P_{EC_S_{U1\#}} = 3 \left((I_{estator1}^-)^2 r_{estator1} \right) \cdot m_E^2 \cdot k_{yf} + 3 \left((I_{estator1}^0)^2 r_{estator1} \right) \cdot m_E^2 \cdot k_{yf} \quad (3.81)$$

$$\Delta P_{EC_S_{eN\#}} = \Delta P_{EC1} \sum_{\substack{h=3n+1 \\ n=1,2,3,\dots,\infty}} h^2 \left(\frac{I_{h-s}^+}{I_{1-s}} \right)^2 + \Delta P_{EC1} \sum_{\substack{h=3n+2 \\ n=0,1,2,\dots,\infty}} h^2 \left(\frac{I_{h-s}^-}{I_{1-s}} \right)^2 + \Delta P_{EC1} \sum_{\substack{h=3n+3 \\ n=0,1,2,\dots,\infty}} h^2 \left(\frac{I_{h-s}^0}{I_{1-s}} \right)^2 \quad (3.82)$$

Las anteriores ecuaciones describen las pérdidas de potencia provocadas por un campo magnético sin rotación, a continuación se tendrá en cuenta la rotación del campo. La forma del campo magnético giratorio generalmente es circular. El campo magnético giratorio que se establece en las máquinas rotativas interactúa con las corrientes de rotor y produce movimiento. Las asimetrías y características constructivas pueden deformar el campo magnético giratorio tornándolo elíptico. Las corrientes del rotor a su vez producen flujos magnéticos que distorsionan el campo magnético giratorio [73]. Una fuente de tensión asimétrica también distorsiona al campo magnético giratorio.

La representación de los diferentes campos magnéticos giratorio pueden verse en la figura 3-30, en el cual el campo tiene componentes en los ejes “r” y “t”. En la figura 3-30, L_{long} es la magnitud del eje mayor del flujo y L_{short} es la longitud del eje menor del flujo. “c” es la razón entre L_{short} y L_{long} . La figura 3-30a es el campo magnético giratorio circular o ideal, la figura 3-30b es el campo magnético giratorio elíptico, y la figura 3-30c es el campo magnético giratorio distorsionado.

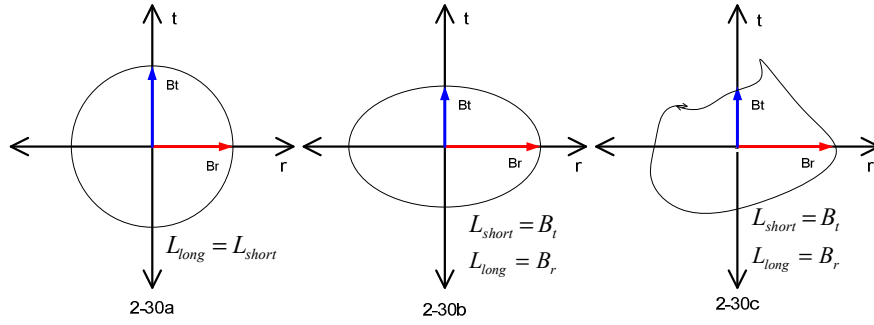


Figura 3-30. Campo magnético giratorio en máquinas rotativas.

Las pérdidas provocadas por las corrientes de Eddy cuando existe un campo magnético giratorio (ΔP_{EC_ROT}) son función de ΔP_{EC_ALT} , L_{short} , L_{long} , y de γ (γ es un factor que depende de las características constructivas de la máquina y del tipo de material del núcleo) [76].

$$\Delta P_{EC_ROT} = \gamma \frac{L_{short}}{L_{long}} \Delta P_{EC_ALT} = \gamma \cdot c \cdot \Delta P_{EC_ALT} \quad (3.83)$$

ΔP_{EC} en las máquinas rotativas puede expresarse como la contribución de ΔP_{EC_ALT} y de ΔP_{EC_ROT} :

$$\Delta P_{EC} = \Delta P_{EC_ALT} + \Delta P_{EC_ROT} = \Delta P_{EC_ALT} (1 + \gamma \cdot c) \quad (3.84)$$

Las pérdidas provocadas por las corrientes de Eddy en las máquinas rotativas son mayores que en los transformadores. La rotación ocasiona que la máquina aumente las pérdidas en un factor $(1 + \gamma c)$. La rotación en las máquinas provoca más variación con respecto al tiempo y por ende mayores pérdidas. De acuerdo a lo anterior, ΔP_{EC} es proporcional con el cuadrado de la corriente y con el cuadrado de la frecuencia. Las pérdidas de Eddy asociadas con la demanda de P_1^+ no se pueden eliminar pues P_1^+ es la única potencia eficiente que suministra o demanda la máquina. A iguales valores de corriente, las pérdidas de Eddy asociadas con la demanda de Q_1^+ y $S_{U1\#}$ provocan los mismos efectos, esto se debe a que $\Delta P_{EC_Q_1^+}$ y $\Delta P_{EC_S_{U1\#}}$ están multiplicados por las mismas constantes. Las pérdidas de Eddy asociadas con $S_{eN\#}$ provocan mayores efectos debido a que $\Delta P_{EC_S_{eN\#}}$ es proporcional al cuadrado de la frecuencia ó lo que es lo mismo proporcional al cuadrado del orden del armónico (h), a medida que aumenta h aumenta $\Delta P_{EC_S_{eN\#}}$. La secuencia de rotación de los armónicos, ecuación (3.82), no influye en el aumento o disminución $\Delta P_{EC_S_{eN\#}}$, ya que las pérdidas provocadas por las corrientes armónicas de secuencia positiva, negativa y cero están multiplicados por las mismas constantes.

De acuerdo a las anteriores consideraciones, para minimizar ΔP_{EC} se recomienda compensar primero $S_{eN\#}$, ya que es la potencia ineficiente de la carga que produce mayores pérdidas. Las

otras potencias ineficientes de la carga (Q_1^+ y $S_{U1\#}$) provocan menores e iguales pérdidas y en este caso pueden compensarse en cualquier orden.

3.3.1.3. Pérdida de potencia provocada por la histéresis en los núcleos de las máquinas rotativas.

Los núcleos ferromagnéticos de las máquinas rotativas tienen características similares que los núcleos de los transformadores eléctricos. Así que el fenómeno de histéresis para las máquinas rotativas es bastante parecido al fenómeno de histéresis producido en los transformadores. El fenómeno de histéresis en los núcleos ferromagnéticos fue descrito en la sección 3.1 correspondiente a las pérdidas de potencia en los transformadores eléctricos. La diferencia entre el fenómeno de histéresis de los transformadores y el de las máquinas rotativas son las características del campo magnético que los atraviesa. En los transformadores eléctricos el campo magnético producido es alterno. En las máquinas rotativas el campo magnético producido es alterno y giratorio [73]. Las pérdidas por histéresis provocadas por el campo magnético alterno en los transformadores se pueden comparar a las pérdidas por histéresis producida por el campo magnético alterno de las máquinas. Las pérdidas de potencia producidas por la histéresis en las máquinas en presencia de un campo magnético alterno son (ΔP_{Hist_ALT}):

$$\Delta P_{Hist_ALT} = K_s B^{1.6} f_1 \quad (3.85)$$

Al igual que en los transformadores eléctricos, en el análisis sólo se tendrá en cuenta la componente fundamental para el cálculo de ΔP_{Hist_ALT} , ya que el efecto de las componentes armónicas en ΔP_{Hist_ALT} es prácticamente despreciable [79].

En la expresión (3.85), K_s es el coeficiente de Steinmetz que depende del tipo de núcleo, B es el valor pico de la inducción magnética que depende de la magnitud de la tensión de la fuente de excitación, y f_1 es la frecuencia fundamental de la fuente de tensión que genera el campo, ΔP_{Hist_ALT} depende entonces de las variaciones que tengan la magnitud de la tensión y la frecuencia de fuente de tensión que genera el campo.

En las máquinas rotativas el campo magnético que se produce además de ser alterno es giratorio. Al ser giratorio las pérdidas por histéresis dependen de L_{short} , L_{long} y γ [73]. Las pérdidas por histéresis producidas por un campo magnético giratorio (ΔP_{Hist_ROT}) están dadas por:

$$\Delta P_{Hist_ROT} = \frac{L_{short}}{L_{long}} \cdot \gamma \cdot \Delta P_{Hist_ALT} = c \cdot \gamma \cdot \Delta P_{Hist_ALT} \quad (3.86)$$

Las pérdidas por histéresis en las máquinas rotativas (ΔP_{Hist}) es la combinación de ΔP_{Hist_ALT} y de ΔP_{Hist_ROT} :

$$\Delta P_{Hist} = \Delta P_{Hist_ALT} + \Delta P_{Hist_ROT} = \Delta P_{EC_ALT} (1 + \gamma \cdot c). \quad (3.87)$$

ΔP_{Hist} se considera constante pues la magnitud de la tensión y frecuencia de la fuente de excitación prácticamente no tienen variación con el tiempo.

Existen pruebas experimentales para medir las pérdidas por histéresis en las máquinas rotativas. Estas pruebas pueden consultarse en [45], [70], [80]. Es de importancia anotar que ΔP_{Hist} no depende de la corriente que demanda o suministra la máquina. Así que las corrientes de la carga no ocasionan variación alguna en ΔP_{Hist} .

3.3.1.4. Pérdidas de potencia mecánicas de las máquinas rotativas.

Las pérdidas mecánicas (ΔP_m) de las máquinas eléctricas que disponen de un eje u órgano giratorio son debidas a los rozamientos de los cojinetes, a la fricción de las escobillas y a la ventilación o rozamiento con el aire. ΔP_m se divide en las pérdidas provocadas por rozamiento y fricción (ΔP_r) y en las pérdidas provocadas por la ventilación de la máquina (ΔP_v):

$$\Delta P_m = \Delta P_r + \Delta P_v. \quad (3.88)$$

ΔP_r es directamente proporcional a la velocidad de rotación (n). ΔP_v es directamente proporcional al cubo de la velocidad [72] y [81]:

$$\Delta P_r = A \cdot n. \quad (3.89)$$

$$\Delta P_v = B \cdot n^3. \quad (3.90)$$

Donde, A y B son constantes de proporcionalidad que dependen de las características constructivas de la máquina. Las ineficiencias de potencia de la carga no influyen notoriamente en la variación de la velocidad en las máquinas rotativas. Así que es posible afirmar que ΔP_m no dependen de las tensiones o corrientes de la máquina. Teniendo en cuenta de que la mayoría de las máquinas trabajan a velocidad casi constante se puede afirmar que ΔP_m representa una de las pérdidas constantes en las máquinas rotativas. Las potencias ineficientes de la máquina no influyen en el aumento o disminución de ΔP_m .

3.3.1.5. Pérdida de potencia provocada por las corrientes de Eddy en la carcasa y alrededores de las máquinas rotativas.

La pérdida potencia en la carcasa de las máquinas rotativas es la pérdida debido a las corrientes de Eddy que se inducen en la carcasa, ventilador, eje, y otros herrajes metálicos (ΔP_{OSL}). Las corrientes de Eddy dependen del campo magnético que genera la máquina. El campo magnético de las máquinas rotativas es alterno y giratorio. Sin embargo, de acuerdo a [73], ΔP_{OSL} en las máquinas rotativas sólo depende del campo magnético alterno y no del giratorio.

Capítulo 3. Pérdidas y efectos en los sistemas eléctricos provocados por la conexión de cargas ineficientes.

De acuerdo a lo anterior, ΔP_{OSL} pueden modelarse de la misma manera en transformadores que en motores. ΔP_{OSL} en las máquinas rotativas está dada por:

$$\Delta P_{OSL} = \Delta P_{OSL1} \sum_{h=1} h^{0.8} \left(\frac{I_h}{I_{estator1}} \right)^2 \quad (3.91)$$

donde, ΔP_{OSL1} es la pérdida de potencia en la carcasa producida a frecuencia (f_1) y corriente nominal ($I_{1_estator_nominal}$). ΔP_{OSL1} puede calcularse de acuerdo a [72], restando a la potencia que demanda la máquina en condiciones nominales ($P_{nominal1}$) las pérdidas de potencia fundamentales nominales ($\Delta P_{nominal1}$). La medida de $P_{nominal1}$ y de $\Delta P_{nominal1}$ puede consultarse en [72] para diferentes tipos de motores y generadores.

$$\Delta P_{OSL1} = P_{nominal1} - \Delta P_{nominal1} \quad (3.92)$$

Siguiendo el mismo procedimiento de la sección anterior, ΔP_{OSL} al depender de la corriente de la máquina, está compuesta por las pérdidas en la carcasa provocadas por la demanda de P_1^+ ($\Delta P_{OSL_P_1^+}$), Q_1^+ ($\Delta P_{OSL_Q_1^+}$), $S_{U1\#}$ ($\Delta P_{OSL_S_{U1\#}}$), y $S_{eN\#}$ ($\Delta P_{OSL_S_{eN\#}}$).

En sistemas eléctricos ideales con tensiones y corrientes sinusoidales en fase y equilibradas, la máquina suministra o demanda corriente activa fundamental de secuencia positiva ($I_{1_estator}^{+a}$), la cual está asociada con la transferencia útil de potencia a la carga o la potencia activa de secuencia positiva (P_1^+). Así que de acuerdo a (3.91), $\Delta P_{OSL_P_1^+}$ está dada por:

$$\Delta P_{OSL_P_1^+} = \Delta P_{OSL1} \sum_{h=1} h^{0.8} \left(\frac{I_{1_estator}^{+a}}{I_{1_estator_nominal}} \right)^2 \quad (3.93)$$

En el caso de que la máquina suministre o demande potencia reactiva de secuencia positiva (Q_1^+), se establece la corriente reactiva fundamental de secuencia positiva ($I_{1_estator}^{+r}$). Así que de acuerdo a (3.91), $\Delta P_{OSL_Q_1^+}$ está dada por:

$$\Delta P_{OSL_Q_1^+} = \Delta P_{OSL1} \sum_{h=1} h^{0.8} \left(\frac{I_{1_estator}^{+r}}{I_{1_estator_nominal}} \right)^2 \quad (3.94)$$

En el caso de que la máquina suministre o demande ($S_{U1\#}$), se establece la corriente fundamental de secuencia negativa ($I_{1_estator}^-$) y la corriente fundamental de secuencia cero ($I_{1_estator}^0$). Así que de acuerdo a (3.91), $\Delta P_{OSL_S_{U1\#}}$ está dada por:

$$\Delta P_{OSL_S_{U1\#}} = \Delta P_{OSL1} \left(\sum_{h=1} h^{0.8} \left(\frac{I_{1_estator}^-}{I_{1_estator_nominal}} \right)^2 + \sum_{h=1} h^{0.8} \left(\frac{I_{1_estator}^0}{I_{1_estator_nominal}} \right)^2 \right) \quad (3.95)$$

En el caso de que la máquina demande o suministre ($S_{eN\#}$), se establecen las corrientes armónicas ($I_{h_estator}$). Así que de acuerdo a (3.91), $\Delta P_{OSL_S_{eN\#}}$ está dada por:

$$\Delta P_{OSL_S_{eN\#}} = \Delta P_{OSL1} \sum_{h=1} h^{0.8} \left(\frac{I_{h_estator}}{I_{1_estator_nominal}} \right)^2 \quad (3.96)$$

$I_{h_estator}$ está compuesta por armónicos de secuencia positiva, negativa y cero, de esta forma $\Delta P_{OSL_S_{eN\#}}$ puede expresarse de la siguiente manera:

$$\Delta P_{OSL_S_{eN\#}} = \Delta P_{OSL1} \sum_{\substack{h=3n+1 \\ n=1,2,3,\dots,\infty}} h^{0.8} \left(\frac{I_{h_estator}^+}{I_{1_estator_nominal}^+} \right)^2 + \Delta P_{OSL1} \sum_{\substack{h=3n+2 \\ n=0,1,2,\dots,\infty}} h^{0.8} \left(\frac{I_{h_estator}^-}{I_{1_estator_nominal}^-} \right)^2 + \Delta P_{OSL1} \sum_{\substack{h=3n+3 \\ n=0,1,2,\dots,\infty}} h^{0.8} \left(\frac{I_{h_estator}^0}{I_{1_estator_nominal}^0} \right)^2$$

Ecuación (3.97).

De acuerdo a las expresiones (3.93)-(3.97), ΔP_{OSL} depende de la corriente de la máquina, a medida que se incrementa la corriente de la máquina se incrementa ΔP_{OSL} . En las expresiones de $\Delta P_{OSL_P_1^+}$, $\Delta P_{OSL_Q_1^+}$, $\Delta P_{OSL_S_{U1\#}}$, $\Delta P_{OSL_S_{eN\#}}$ están multiplicadas por las mismas constantes. $\Delta P_{OSL_P_1^+}$, $\Delta P_{OSL_Q_1^+}$, $\Delta P_{OSL_S_{U1\#}}$, $\Delta P_{OSL_S_{eN\#}}$ también varían con la frecuencia en un factor exponencial de 0.8, así que entre mayor sea el orden del armónico “h” menor es el término “ $h^{0.8}$ ” en las ecuaciones (3.93)-(3.97) y por ende menor es ΔP_{OSL} . En este caso las pérdidas de potencia en la carcasa de la máquina son mayores cuando la carga demanda corriente fundamental. A iguales valores de corriente rms para cada una de las potencias que suministra o demanda la máquina, $\Delta P_{OSL_P_1^+}$, $\Delta P_{OSL_Q_1^+}$, y $\Delta P_{OSL_S_{U1\#}}$ son mayores con respecto a $\Delta P_{OSL_S_{eN\#}}$.

La inducción de corrientes de Eddy en la carcasa y alrededores disminuye cuando la frecuencia de las corrientes de la carga aumenta, y por eso la componente fundamental de corriente provoca mayores pérdidas de potencia que las pérdidas de potencia provocadas por los armónicos de corriente. P_1^+ , Q_1^+ , y $S_{U1\#}$ provocan mayores pérdidas en la carcasa de la máquina.

3.3.2. Efectos de las potencias ineficientes en el par de las máquinas rotativas.

El par es la fuerza que se le aplica a un elemento en movimiento. En el caso de las máquinas rotativas, el par representa la fuerza disponible para producir la rotación. En las máquinas rotativas por los conductores del rotor circulan corrientes, por los conductores del estator también circulan corrientes que producen un campo magnético. Los conductores del rotor se encuentran inmersos en el campo magnético producido por el estator. La interacción entre las corrientes del rotor y el campo magnético del estator producen pares eléctricos. El par depende de la corriente del estator, por eso un eventual cambio de la alimentación de la máquina produce una gran variación en su par.

Si una máquina es alimentada con un sistema trifásico de tensiones ideales, se produce un par fundamental en uno de los sentidos de rotación de la máquina. De acuerdo a [82], los

Capítulo 3. Pérdidas y efectos en los sistemas eléctricos provocados por la conexión de cargas ineficientes.

armónicos y desequilibrios presentes en la alimentación de la máquina producen pares pulsantes. Los pares pulsantes son de diferente frecuencia que el par fundamental y pueden ir en el mismo o diferente sentido que este. El sentido y la frecuencia del par pulsante generado dependen de la frecuencia y del sentido de rotación. En la tabla 3-1, se resumen los pares pulsantes generados por un convertidor de 6 pulsos convencional [82].

Orden del armónico	Frecuencia (Hz)	Secuencia de rotación	Sentido de rotación	Frecuencia de rotación
1	50	+	Igual	
5	250	-	Opuesto	6
7	350	+	Igual	6
11	550	-	Opuesto	12
13	650	+	Igual	12
17	850	-	Opuesto	18
19	950	+	Igual	18
23	1150	-	Opuesto	24
25	1250	+	Igual	24

Tabla 3-1. Pares pulsantes generados en máquinas rotativas, tabla obtenida de [82].

En la tabla 3-1, se muestran los pares pulsantes que generan los armónicos de tensión de un convertidor de 6 pulsos. La primera columna muestra el orden del armónico de tensión del convertidor, la segunda columna representa la frecuencia de cada armónico de tensión del convertidor, la tercera columna es la secuencia de rotación de los armónicos de tensión, la cuarta columna indica el sentido de rotación del par pulsante generado, y la quinta columna es la frecuencia de rotación del par pulsante generado. El armónico 5° de tensión por ejemplo genera un par pulsante en sentido contrario al par fundamental y con frecuencia igual a 6 veces la frecuencia de rotación fundamental.

También algunas tensiones armónicas generan pares pulsantes de la misma frecuencia pero diferente sentido de rotación. Los pares pulsantes que tienen el mismo sentido que el par fundamental aceleran la máquina en ciertos momentos. Los pares pulsantes que tienen sentido opuesto al sentido de rotación del par fundamental la desaceleran. La aceleración y desaceleración no controlada en la máquina produce vibraciones, estas vibraciones producen ruido, más pérdidas rotacionales y desajustan las piezas dañando la máquina o exigiendo

mantenimiento más frecuente. En casos extremos, dependiendo de la magnitud de los pares pulsantes se puede presentar ruptura del eje de la máquina.

Las asimetrías en la tensión de suministro y los desequilibrios de la carga también provocan pares pulsantes. De acuerdo a [45], a iguales valores de tensión rms, las tensiones asimétricas y las tensiones armónicas incrementan en la misma medida los pares pulsantes y las pérdidas de potencia.

3.3.3. Resumen de las pérdidas de potencia y efectos en las máquinas rotativas.

De acuerdo a lo expuesto en las secciones anteriores $\Delta P_{maquina}$ se puede escribir de la siguiente manera:

$$\Delta P_{trafo} = \Delta P_{Hist} + \Delta P_m + \Delta P_{Cu} + \Delta P_{EC} + \Delta P_{OSL} \quad (3.98)$$

ΔP_{Hist} se debe a la magnetización y desmagnetización del núcleo, es considerada constante ya que depende de la tensión y frecuencia fundamental de alimentación de la máquina. ΔP_m se debe por la fricción, rozamiento y ventilación; es considerada constante ya que depende de la velocidad y las características constructivas de la máquina. ΔP_{Cu} es provocada por la circulación de corrientes en los devanados del estator y el rotor, tiene en cuenta el efecto pelicular, y el efecto de proximidad, está relacionada directamente con la corriente de la máquina y todas las ineficiencias de potencia la afectan en la misma medida. ΔP_{EC} es provocada por las corrientes de Eddy en los núcleos de la máquina, se incrementa significativamente cuando la máquina demanda $S_{eN\#}$, ya que, ΔP_{EC} es proporcional al cuadrado de la corriente y al cuadrado de la frecuencia. ΔP_{OSL} es la pérdida provocada por las corrientes de Eddy inducida en la carcasa y alrededores de la máquina, se incrementa cuando la carga demanda Q_1^+ y $S_{U1\#}$, ya que, ΔP_{OSL} disminuye a medida que aumenta la frecuencia.

Cuando la máquina suministra o demanda $S_{U1\#}$ y $S_{eN\#}$, se generan pares pulsantes. Los pares pulsantes provocan vibraciones, inestabilidad, y más pérdidas de potencia. El efecto de los pares pulsantes provocados por $S_{U1\#}$ y $S_{eN\#}$ es similar ya que las vibraciones y pérdidas de potencia son similares.

ΔP_{Hist} y ΔP_m no dependen de las potencias ineficientes de la máquina, y ΔP_{Cu} es afectada en igual medida por las potencias ineficientes. ΔP_{EC} es provocada por las corrientes de Eddy inducidas en el núcleo y devanados de la máquina. ΔP_{OSL} es provocada por las corrientes de Eddy inducidas en la carcasa y alrededores. La inducción por corrientes de Eddy es mayor en los lugares cercanos a la fuente de excitación. La fuente de excitación de las corrientes de Eddy son los devanados del rotor y del estator, por lo que, las corrientes de Eddy inducidas son mayores en el núcleo y devanados que en la carcasa y alrededores. Debido a las anteriores consideraciones el efecto de ΔP_{EC} es mayor que el efecto provocado por ΔP_{OSL} . ΔP_{EC} es

Capítulo 3. Pérdidas y efectos en los sistemas eléctricos provocados por la conexión de cargas ineficientes.

afectada en mayor medida cuando la carga demanda $S_{eN\#}$. ΔP_{OSL} es afectada en mayor medida cuando la máquina suministra o demanda Q_1^+ y $S_{U1\#}$. Las potencias $S_{U1\#}$ y $S_{eN\#}$ generan pares pulsantes que provocan los mismos efectos en las máquinas rotativas, Q_1^+ no provoca pares pulsantes.

3.4. Conclusiones

En el presente capítulo se resumieron las pérdidas de potencia y los efectos que aparecen debido a la conexión de cargas ineficientes. Se relacionó cada magnitud de potencia ineficiente con cada pérdida o efecto para los sistemas eléctricos. La descripción de las pérdidas y efectos se realizó en conductores, transformadores y máquinas rotativas.

Las potencias que demanda la carga influyen directamente sobre las pérdidas en el sistema eléctrico de potencia. A medida que la carga es más ineficiente provoca mayores pérdidas de potencia en el sistema eléctrico. Para disminuir el efecto de las potencias ineficientes de la carga sobre el sistema eléctrico hay que tratar de compensarlas en el lugar más cercano posible al lugar donde se originen. Para esto se pueden utilizar los compensadores activos.

Las ineficiencias de potencia afectan de diferente manera los elementos de los sistemas eléctricos de potencia. Las ineficiencias de potencia que afectan en mayor medida a los conductores de alimentación son aquellas que provocan la circulación de corrientes por el neutro. Las ineficiencias de potencia que afectan en mayor medida a los transformadores son aquellas que provocan el calentamiento excesivo o la sobrecarga de los transformadores (armónicos y reactiva). Las ineficiencias que afectan en mayor medida a los generadores son aquellas que provocan su inestabilidad, que de acuerdo a la IEEE Std. 1459-2010, es la potencia reactiva.

Las corrientes ineficientes que circulan por el sistema eléctrico y que son demandadas por la carga provocan pérdidas y efectos nocivos. Con el fin de poder facturar la demanda de potencia en las cargas y estas pérdidas, la IEEE basa el cálculo de potencia en V_e e I_e . La corriente I_e es calculada basada en las pérdidas de los conductores de alimentación teniendo en cuenta las corrientes que demanda el consumidor o cliente. Bajo esta consideración, realmente cada magnitud de potencia de la IEEE Std. 1459-2010 se encuentra sobrevalorada. Si se desea cuantificar la potencia que demanda la carga se pueden usar las magnitudes de potencia propuestas en la sección 1.2.3.4. Si se desea obtener las pérdidas en el sistema eléctrico de distribución se deben usar las ecuaciones de este capítulo.

Las potencias ineficientes que demanda la carga influyen directamente sobre muchos de los problemas que aparecen en los sistemas eléctricos de potencia. Una carga ineficiente puede influir sobre las cargas vecinas ocasionando numerosos problemas e inestabilidad de cargas sensibles. Para evitar este tipo de situaciones se deben de detectar estas cargas ineficientes y tratar de solucionar el problema donde se origina.

4. Compensador activo de potencia paralelo (SAPC).

Una vez determinadas las diversas situaciones ineficientes que pueden plantearse en los sistemas de distribución de energía eléctrica, los efectos adversos que producen sobre los elementos del sistema, y la herramienta matemática para la cuantificación de las ineficiencias, en este capítulo se aborda el diseño y control de un compensador activo de potencia selectivo para la mejora de la eficiencia y la calidad de los sistemas eléctricos de distribución de energía.

El sistema eléctrico del diagrama unifilar de la figura 4-1 está compuesto por una fuente de tensión AC trifásica y una carga no eficiente que demanda P_1^+ , Q_1^+ , $S_{eN\#}$, y $S_{U1\#}$. Se define a i_{z_s} como la corriente que la fuente suministra (el subíndice “s” hace referencia a “supply”) y a i_{z_load} como la corriente que la carga demanda. En condiciones normales de funcionamiento, la fuente debe suministrarle a la carga toda la corriente que esta demanda ($i_{z_s}=i_{z_load}$).

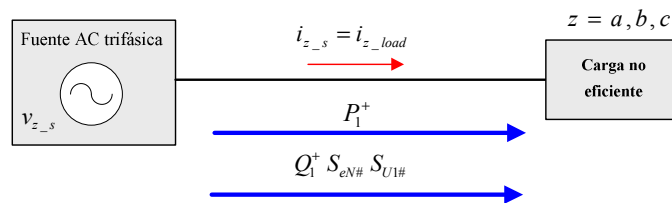


Figura 4-1. Corrientes y potencias en los sistemas eléctricos.

En el pasado fueron definidas expresiones de gran valor que sirvieron para cuantificar las potencias eficientes e ineficientes de los sistemas eléctricos. En esta tesis, algunas de estas expresiones fueron descartadas por las siguientes razones:

- Budeanu en 1927 [2], con su teoría de la potencia en el dominio de la frecuencia, definió a P para referirse a todas las componentes de potencia activa de la carga, definió a Q para referirse a todas las componentes de potencia reactiva de la carga, y definió a D para referirse a todas las componentes de potencia provocadas por la distorsión armónica de la corriente y de la tensión. Para Budeanu, P era el término de potencia considerado eficiente, mientras que Q y D eran considerados ineficientes. así que, en la teoría de Budeanu para referirse a los términos de potencia eficiente se utilizaba la expresión “potencia activa”, mientras que para referirse a los términos de potencia ineficiente se utilizaban las expresiones “potencia reactiva” y “potencia de distorsión”. La expresión “potencia activa” para referirse a la potencia eficiente es incorrecta, ya que la potencia P engloba todos los términos de potencia activa

definidos en la IEEE Std. 1459-2010 (P_1^+ , P_1^- , P_1^0 , y P_H), de las que sólo P_1^+ es eficiente convirtiéndose en energía útil o trabajo.

- Fryze en 1932 [1], con su teoría de potencia en el dominio temporal, definió a P para referirse a todas las componentes de potencia activa de la carga, y definió a Q para referirse a todas las componentes de potencia no activas de la carga. Para Fryze, P era el término de potencia considerado eficiente, mientras que Q era considerado ineficiente. Así que, en la teoría de Fryze para referirse a los términos de potencia eficientes se utilizaba la expresión “potencia activa”, mientras que para referirse a los términos de potencia ineficiente se utilizaba la expresión “potencia no activa”. Al igual que la teoría de Budeanu, la potencia P de Fryze también engloba todos los términos de potencia activa eficiente e ineficientes (P_1^+ , P_1^- , P_1^0 , y P_H) por lo que el uso de la expresión “potencia activa” para referirse a potencias eficientes es incorrecto. La expresión de “potencia no activa” para referirse a los términos ineficientes de potencia también es incorrecta pues existen términos de potencia activa (P_1^- , P_1^0 , y P_H) que también son considerados ineficientes teniendo en cuenta las teorías más modernas.

Basados en la descomposición propuesta en la IEEE Std. 1459-2010, en esta tesis la expresión “potencia eficiente” sólo se le atribuirá a P_1^+ , mientras que la expresión “potencia ineficiente” se le atribuirá al resto de términos de potencia activa (P_1^- , P_1^0 , y P_H), a todos los términos de potencia reactiva (Q_1^+ , Q_1^- , Q_1^0 , y Q_H), a todos los términos que hagan referencia al desequilibrio de corrientes y/o asimetría de tensión ($S_{U1\#}$, S_1^- , y S_1^0), y a todos los términos de potencia que hagan referencia a la distorsión de corriente y/o tensión ($S_{eN\#}$, $D_{eI\#}$, $D_{eV\#}$, y $S_{eH\#}$).

En este capítulo a cada término de potencia que demanda la carga se le asociará una corriente deduciéndose sus expresiones. De acuerdo a la IEEE Std. 1459-2010 y a la teoría de la potencia instantánea del capítulo 2, i_{z_load} puede descomponerse como sigue:

$$i_{z_load} = i_{z1_load}^{+a} + i_{z1_load}^{+r} + i_{zU1_load} + i_{zH_load} \quad (4.1)$$

donde,

$i_{z1_load}^{+a}$: es la corriente instantánea fundamental de secuencia positiva activa por fase.

$i_{z1_load}^{+r}$: es la corriente instantánea fundamental de secuencia positiva reactiva por fase.

i_{zU1_load} : es la corriente instantánea fundamental de desequilibrio por fase.

i_{zH_load} : es la corriente instantánea no fundamental por fase.

Tal como se establece en [39], [40], [83]-[85], de acuerdo a la teoría de la potencia instantánea del capítulo 2, y a la IEEE Std. 1459-2010, la máxima eficiencia en los sistemas eléctricos se

alcanza cuando el generador sólo entrega P_1^+ . De esta forma, un sistema eléctrico de máxima eficiencia sólo debe demandar $i_{z1_load}^{+a}$. Las otras corrientes ($i_{z1_load}^{+r}$, i_{zU1_load} , e i_{zH_load}), llamadas corrientes ineficientes, provocan respectivamente la demanda de potencias ineficientes (Q_1^+ , $S_{U1\#}$, y $S_{eN\#}$). La demanda de potencias ineficientes por parte de la carga provoca pérdidas de potencia en conductores, transformadores y demás elementos del sistema eléctrico de potencia (capítulo 3).

Una de las opciones para aumentar la eficiencia de los sistemas eléctricos es la utilización del Compensador Activo de Potencia Paralelo (SAPC, Shunt Active Power Compensator). Un SAPC es un dispositivo electrónico usado como fuente de corriente controlada, para suministrar las corrientes ineficientes que está demandando la carga evitando que circulen por la red. La conexión del SAPC se realiza en el pcc quedando en paralelo con la carga en la red de distribución. El SAPC suministra a la carga las potencias ineficientes, por lo que el sistema eléctrico de potencia dejará de entregarlas, evitándose así los efectos adversos sobre el sistema eléctrico y mejorando la eficiencia del mismo. El diagrama unifilar de conexión de un SAPC a la red se muestra en la figura 4-2.

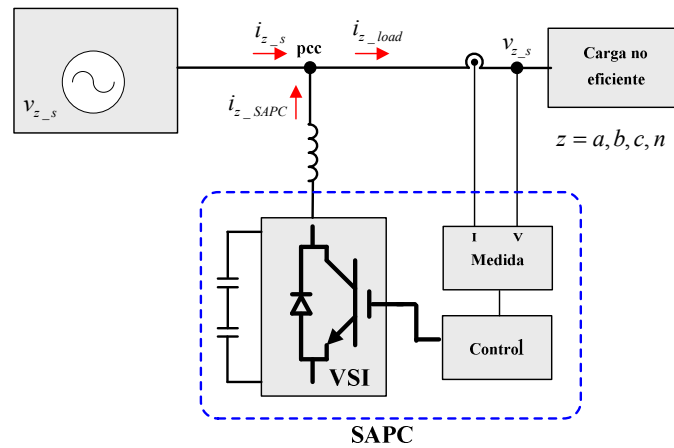


Figura 4-2. Diagrama de conexión de un SAPC.

El punto de conexión común o pcc es el punto de conexión de la carga y el SAPC con la red. En el pcc se establece la tensión de fase neutro v_{z_s} ($z=a,b,c,n$). La corriente instantánea de compensación que genera el SAPC en cada fase es i_{z_SAPC} . El SAPC, a partir de las corrientes de la carga (i_{z_load}), de las tensiones en el pcc (v_{z_s}), y empleando la teoría de potencia deseada, identifica las corrientes ineficientes demandadas por la carga y que empeoran la calidad del sistema eléctrico. Una vez identificadas, el SAPC genera las corrientes de compensación que incluyen las corrientes ineficientes que la carga demanda, y que al ser generadas por el SAPC, ya no deberán ser proporcionadas y transportadas por el sistema eléctrico de potencia. El uso del SAPC contribuye con la reducción de las pérdidas en las líneas y, el aumento de la capacidad de la red, a la mejora la calidad en el suministro de energía y al mayor ahorro

energético. La conexión del SAPC consigue que el conjunto formado por la carga y el propio compensador se comporten, desde el punto de vista del sistema de distribución, como una carga eficiente que sólo consume corrientes eficientes.

El SAPC está formado principalmente por un inversor VSI (Voltage Source Inverter). Existen diferentes topologías para los inversores, pudiendo hablar de convertidores de dos niveles y convertidores multinivel. Los convertidores de dos niveles han sido difundidos ampliamente en aplicaciones de baja tensión y para el control de motores de inducción, mientras que los convertidores multinivel son utilizados principalmente en aplicaciones que requieren alta tensión y están empezando a utilizarse en otros convertidores de potencias altas (inversores fotovoltaicos, variadores de velocidad, etc.). Para el desarrollo de los estudios objeto de esta tesis se ha utilizado un inversor de dos niveles el cual será descrito posteriormente.

Los inversores están formados por interruptores de potencia siendo habitual el uso de transistores IGBT (Insular Gate Bipolar Transistor) en antiparalelo con diodos. El interruptor como asociación IGBT-Diodo se muestra en la figura 4-3. Esta asociación permite la conducción bidireccional de corriente y el establecimiento de tensiones unidireccionales.

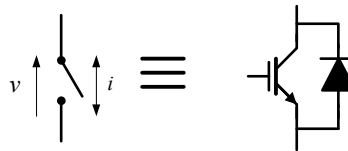


Figura 4-3. Configuración de los interruptores de un inversor.

Los inversores también pueden ser clasificados de acuerdo al número de interruptores de potencia que utilicen. Para los inversores de dos niveles conectados a un sistema trifásico a cuatro hilos podemos utilizar puentes inversores trifásicos de tres ramas o de cuatro ramas. Para validar los resultados de la tesis se ha utilizado para el SAPC un inversor trifásico de dos niveles, tres ramas y cuatro hilos, tal como puede verse en la figura 4-4.

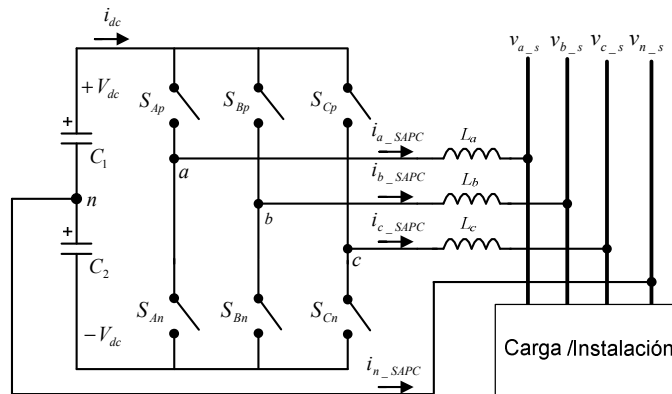


Figura 4-4. Etapa de potencia de un SAPC con inversor trifásico de tres ramas y cuatro hilos.

La rama de la fase a está formada por los interruptores S_{Ap} y S_{An} , la rama de la fase b está formada por los interruptores S_{Bp} y S_{Bn} , y la rama de la fase c está formada por los interruptores S_{Cp} y S_{Cn} . La configuración de condensadores C_1 y C_2 del bus de continua con el punto medio accesible es utilizada para obtener el neutro del inversor, el cual es necesario para su conexión a sistemas trifásicos a cuatro hilos. Las bobinas L_a , L_b , y L_c en la salida de AC son utilizadas para que el inversor se comporte como una fuente de corriente controlada.

La etapa de control de los inversores está formada por una unidad de control generalmente un procesador digital de señal o DSP [86]. Para realizar el control de los IGBT's se requiere de la medida de los voltajes y corrientes de la carga. A partir de las medidas realizadas, el procesador digital se encarga de calcular las corrientes de compensación a inyectar en el pcc. Una vez calculadas se realiza un control de corriente para asegurar que las corrientes que se generan sean iguales a las calculadas. Aplicando una técnica de modulación adecuada se disparan los semiconductores de la etapa de potencia [87].

El objetivo de un SAPC es el de mejorar la eficiencia del sistema aguas arriba del punto donde se conecta el SAPC ó pcc. Para que el SAPC funcione correctamente las corrientes ineficientes de la carga deben de ser iguales a las corrientes de compensación y deben fluir desde el SAPC hacia la carga, además no debe de existir circulación de corriente entre el sistema eléctrico de distribución y el SAPC (exceptuando la corriente necesaria para mantener el bus DC a la tensión adecuada).

En la actualidad, se utilizan diversas estrategias para la compensación de potencia ineficiente mediante SAPC's, entre las cuales se encuentran:

- La estrategia de compensación global: es la estrategia más habitual, en la que el SAPC suministra a la carga las corrientes ineficientes que demanda sin distinguir entre las diversas componentes de corrientes ineficientes.
- La estrategia de compensación selectiva: con esta estrategia se identifica cada corriente ineficiente de la carga y el SAPC suministra a la carga las corrientes ineficientes que la carga demanda y el circuito de control determine. Esta estrategia es útil cuando la potencia ineficiente total demandada por la carga excede la potencia aparente que el SAPC puede entregar a la salida.

En términos generales las dos estrategias realizan una función similar, sin embargo, para aumentar la eficiencia de los sistemas eléctricos y para determinadas aplicaciones se requiere la selección de las corrientes ineficientes. En las siguientes secciones, se deducirán las corrientes de compensación en la estrategia de compensación global y en la estrategia de compensación selectiva.

4.1. Corrientes de compensación en la estrategia de compensación global.

La estrategia de compensación global consiste en compensar todos los fenómenos ineficientes de la carga simultáneamente. Es usada cuando el SAPC tiene la capacidad de potencia aparente suficiente para compensar todas las corrientes ineficientes demandadas por la carga. La compensación global puede basarse en diversas teorías de la potencia eléctrica [87]-[90], las cuales han sido analizadas en [87] y son resumidas a continuación:

- En [88] se utiliza la teoría de la potencia reactiva instantánea, también llamada teoría $p-q$. Es una de las teorías más difundidas y ha sido mejorada y generalizada por diversos autores [90], [91]. Utiliza la transformada de Clarke para separar las componentes instantáneas activas y reactivas de las corrientes. La componente instantánea activa es la componente útil de la carga, mientras que la componente reactiva es la componente no útil y por lo tanto debe ser compensada mediante la actuación del SAPC. La teoría $p-q$ tiene el inconveniente que ante un sistema de tensiones asimétrico y/o no lineal no es capaz de lograr que el generador suministre el conjunto de corrientes senoidal equilibrado, de forma que no se alcanza la máxima eficiencia posible. Además con la teoría $p-q$ se realiza la compensación sin distinguir las diferentes componentes de potencia activa.
- En [89] se utiliza el método del sistema de referencia síncrono modificado o teoría $(d-q-0)$. Se basa en la aplicación de la transformada de Park a las corrientes de la carga. Las corrientes son transformadas en la corriente del eje directo (i_d), en la corriente del eje de cuadratura (i_q), y en la corriente homopolar (i_0). i_d se separa a su vez en la componente continua (\bar{i}_d) y en la componente alterna (\tilde{i}_d). Según este método el sistema eléctrico debe suministrar \bar{i}_d , las demás componentes de corriente deben ser compensadas con el SAPC. Igual que ocurre con el método $p-q$ (aunque en distinto grado), el método $d-q-0$ no ofrece resultados óptimos ante sistemas de tensiones de alimentación asimétricos y/o no lineales.
- En [13] se utiliza la estrategia de compensación UPF (Unity Power Factor), reuniendo los resultados propuestos por [1] y [3]. La forma de onda de la corriente que suministra el sistema eléctrico de potencia es proporcional a la forma de onda de la tensión en el pcc cuando el SAPC está operativo. Cuando las tensiones de alimentación sean ineficientes, con el método UPF se demandará del generador corrientes con las mismas ineficiencias, lo que puede conducir en determinadas circunstancias a empeorar la eficiencia del sistema eléctrico. En esta situación sólo se compensarían correctamente las formas de potencia reactiva.

- En [87] se utiliza la estrategia de compensación basada en la IEEE Std. 1459-2010. Tras la compensación, la red sólo suministra corrientes senoidales fundamentales equilibradas y en fase con V_1^+ . Esta estrategia utilizada en el SAPC logra la máxima eficiencia posible en el sistema eléctrico. Esta afirmación es cierta si se asume que, frente al SAPC la red eléctrica es un sistema de potencia infinita, y por tanto un SAPC no podrá corregir las ineficientes presentes en las tensiones de red. Con esta estrategia se garantiza la compensación de P_1^- , P_1^0 , Q_1^+ , Q_1^- , Q_1^0 , Q_H , $D_{eI\#}$, y $S_{H\#}$.

En términos generales, la estrategia de compensación basada en la IEEE Std. 1459-2010 [87] es la estrategia de mejores prestaciones. Tras la compensación, la estrategia de compensación basada en la IEEE Std. 1459-2010 logra que todas las componentes de corriente ineficiente de la carga sean proporcionales por el SAPC y no por la red eléctrica, De forma que desaparece de la red cualquier tipo de potencia que dependa de ellas. Por las anteriores consideraciones, la estrategia de compensación basada en la IEEE Std. 1459-2010 será tomada como punto de partida para el análisis de la compensación global en esta tesis.

Las corrientes de compensación se pueden obtener con ayuda de la medición de las corrientes de la carga (i_{z_load}) y las tensiones en el pcc (v_{z_s}). De acuerdo a la teoría de la potencia instantánea desarrollada en el capítulo 1 y a la IEEE Std. 1459-2010, la única potencia eficiente que demanda la carga es cuantificada mediante P_1^+ . Así que en el caso ideal, $i_{z1_load}^{+a}$ es la única corriente que debe suministrar el sistema eléctrico de distribución. Para ejecutar el cálculo de $i_{z1_load}^{+a}$, se requiere de la medida de un periodo completo de i_{z_load} y v_{z_s} . La corriente $i_{z1_load}^{+a}$ puede obtenerse en como sigue:

1. Aplicando la transformada discreta de Fourier (DFT) a i_{z_load} para cada fase. Se obtiene la amplitud ($\sqrt{2} \cdot I_{z1_load}$) y el desfase (β_1) de la corriente instantánea fundamental (i_{z1_load}). I_{z1_load} es el valor rms de la corriente fundamental demandada por la carga.
2. A partir de los resultados obtenidos en el paso 1, obtener la componente de corriente fundamental de secuencia positiva con ayuda de la transformada de Stokvis-Fortesque [41]. Con este procedimiento se obtiene la amplitud ($\sqrt{2} \cdot I_{z1_load}^+$) y el desfase (β_1^+) de la corriente instantánea fundamental de secuencia positiva ($i_{z1_load}^+$). $I_{z1_load}^+$ es el valor rms de la corriente fundamental de secuencia positiva.
3. Aplicando la transformada discreta de Fourier (DFT) a v_{z_s} para cada fase. Se obtiene la amplitud ($\sqrt{2} \cdot V_{z1_s}$) y el desfase (α_1) de la tensión instantánea fundamental (v_{z1_s}). V_{z1_s} es el valor rms de la tensión fundamental en el pcc.

- Mediante el uso de la transformada de Stokvis-Fortesque y a partir de los resultados obtenidos en el paso 3, obtener la fase (α_1^+) de la tensión fundamental de secuencia positiva (V_1^+).
- Tomando V_1^+ como referencia de los ángulos ($\theta_1^+=\beta_1^+-\alpha_1^+$), obtener el valor de $I_{1_load}^+$ en fase con V_1^+ .

$$I_{1_load}^{+a} = I_{1_load}^+ \cos(\theta_1^+) \quad (4.2)$$

- Finalmente, recordando que $\varphi_a=0$, $\varphi_b=2\pi/3$, $\varphi_c=4\pi/3$, $i_{z1_load}^{+a}$ es calculada como sigue:

$$i_{z1_load}^{+a} = \sqrt{2} I_{1_load}^{+a} \text{sen}(\omega t - \varphi_z + \theta_1^+) \quad (4.3)$$

La corriente que debe generar el compensador en su salida (i_{z_SAPC}) para eliminar de forma global los efectos de las corrientes no eficientes de la carga es obtenida al sustraer de i_{z_load} la única corriente que es considerada eficiente $i_{z1_load}^{+a}$, tal como se expresa a continuación:

$$i_{z_SAPC} = i_{z_load} - i_{z1_load}^{+a} \quad (4.4)$$

$$i_{z_SAPC} = i_{z_load} - \sqrt{2} \cdot I_{1_load}^{+a} \text{sen}(\omega t - \varphi_z + \beta_1^+) \quad (4.5)$$

La utilización de las corrientes definidas en (4.5) provocan la reducción de todas las potencias ineficientes de la carga (Q_1^+ , $S_{UV\#}$, y $S_{eN\#}$) aunque no su completa cancelación. La demanda de P_1^+ idealmente no se verá afectada por la compensación. La figura 4-5 muestra los flujos de potencia en el sistema tras la compensación.

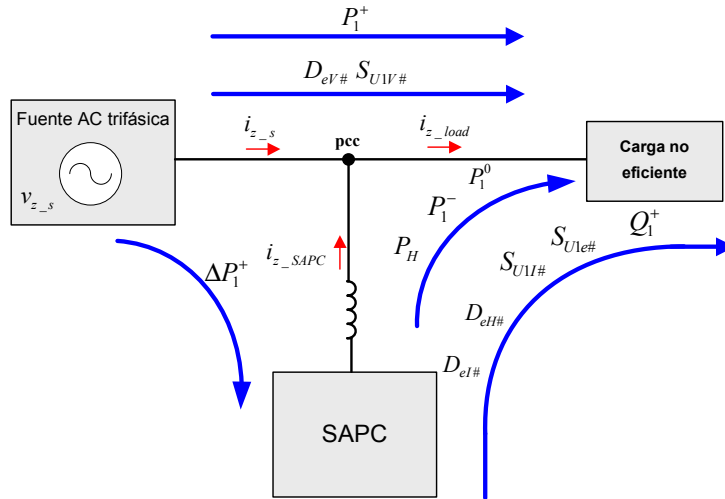


Figura 4-5. Corrientes y flujos de potencia en el sistema con un SAPC tras la compensación global de las ineficiencias de potencia

Durante la compensación mediante las corrientes propuestas en (4.5) entre la fuente de tensión AC y la carga continúa fluyendo P_1^+ , $D_{eV\#}$, y $S_{UV\#}$. La potencia $D_{eV\#}$ es parte de $S_{eN\#}$ pero no

puede ser eliminada con el SAPC ya que representa un término de potencia provocado por las componentes no fundamentales de las tensiones (si las hubiere) y la corriente I_{e1} demandada por la carga. Similarmente, $S_{U1V\#}$ es parte de $S_{U1\#}$ pero no puede ser eliminado con el SAPC ya que representa un término de potencia provocado por la asimetría de las tensiones (si existiese) y la corriente I_1^+ demandada por la carga.

El SAPC suministra a la carga los términos de potencia activa ineficientes (P_1^- , P_1^0 , y P_H), también suministra los términos de potencia ineficiente $D_{e1\#}$, $D_{eH\#}$, $S_{U1V\#}$, $S_{U1e\#}$, y Q_1^+ . Las componentes de $S_{eN\#}$, provocadas por corrientes armónicas, que se pueden compensar con el funcionamiento del SAPC son P_H , $D_{e1\#}$ y $D_{eH\#}$. De la misma forma, $S_{U1V\#}$ y $S_{U1e\#}$ son la parte de $S_{U1\#}$ provocados por corrientes desequilibradas y por lo tanto se pueden compensar con el SAPC. El término de potencia ΔP_1^+ entre la fuente de tensión y el SAPC se debe a que si el SAPC suministra a la carga potencia activa (P_1^- , P_1^0 , y P_H), deberá absorber una potencia activa equivalente de la red eléctrica para compensar la descarga del bus de continua. Además contribuirán a la descarga del bus de continua las propias pérdidas del SAPC que deberán ser incluidas en ΔP_1^+ [87].

4.2. Corriente de compensación para la estrategia de compensación selectiva.

La estrategia de compensación selectiva permite la elección y control de las potencias ineficientes a compensar. En determinadas situaciones, resultará más conveniente utilizar toda la potencia aparente del SAPC en la cancelación de un único fenómeno o en la combinación de varios de ellos.

En la última década se han venido desarrollando trabajos en los cuales se utilizan compensadores selectivos para reducir el efecto de las potencias ineficientes de los sistemas eléctricos. Se advierte un gran incremento de las aplicaciones que tratan de desarrollar compensadores selectivos y la importancia que han venido adquiriendo recientemente. Las referencias bibliográficas más relevantes en este tema son [92]-[96].

En [92] se establece un criterio de selectividad para la compensación de las potencias ineficientes de la carga, donde la prioridad en la compensación se basa en la gravedad de los efectos sobre el sistema de potencia. El criterio de selectividad establece el siguiente orden de preferencia en la compensación de potencias ineficientes: armónicos, desequilibrios, y reactiva. Para aplicar la selectividad se usan unas constantes que determinan la proporción de cada potencia ineficiente a compensar. En el trabajo no aparece un desarrollo que cuantifique la gravedad de cada potencia ineficiente y que justifique el orden establecido, ni tampoco incluye un criterio para elegir las constantes de proporción.

En [93] y [94] se presenta un algoritmo de control para los compensadores serie y shunt que restringe el THD_V y el THD_I en el pcc a los límites especificados en IEEE Std. 519 o en IEC 61000. Al mismo tiempo el algoritmo optimiza el factor de potencia ($PF_1=P_1/S_1$). El algoritmo implementado utiliza una técnica de optimización basada en los polinomios de Lagrange, con esto logra minimizar la potencia aparente aguas arriba del pcc. El algoritmo no distingue entre los diferentes tipos de potencias ineficientes existentes en la carga por lo que no es considerada una estrategia de compensación selectiva, realmente las variables a optimizar son THD_V , THD_I y PF_1 para minimizar indirectamente la potencia aparente. Con la solución de las ecuaciones, mediante la técnica de los polinomios de Lagrange, calcula los voltajes y corrientes de compensación.

En [95] se propone un método para obtener las corrientes de compensación de los SAPC basándose en las magnitudes de potencia que aparecen en la IEEE Std. 1459-2010. Estas corrientes de compensación se utilizan para el control de SAPC con la capacidad de inyectarlas de forma selectiva. Las corrientes de compensación para compensar potencias reactivas, armónicas, y desequilibradas pueden compensarse en cualquier orden o de forma combinada. Sin embargo, en este trabajo no se propone ningún criterio de selectividad u orden en la compensación de la potencia.

En [96] se presenta una metodología para minimizar el costo de los SAPC. Para minimizar el costo minimizan la capacidad del inversor utilizado en su implementación. Para esto se minimiza las corrientes de compensación que debe inyectar. El criterio de selectividad se utiliza básicamente para corrientes armónicas. El SAPC selectivo elige cada corriente armónica y la compensa hasta llevarla a un nivel aceptable según lo establecido por la IEEE Std. 519 y por la ENRE (Nacional Regulador de la Electricidad en Argentina).

En la actualidad no existe en la literatura un criterio por el cual se fije el orden de compensación de las potencias ineficientes de la carga. Mas sin embargo, en la IEEE Std. 1459-2010 se enuncia en su introducción que Q_1^+ es la potencia con la cual se debe tener cuidado extremo, ya que influye notoriamente en la amplitud de la tensión de suministro, afecta la estabilidad de sistemas electromecánicos y provoca pérdidas de energía.

Las corrientes que inyecta el SAPC o corrientes de compensación (i_{z_SAPC}) deben de estar compuestas por todas las componentes de corriente de la carga que ocasionan la demanda de potencia ineficiente en la red. Teniendo en cuenta todos los fenómenos ineficientes de la carga definidos en la IEEE Std. 1459-2010, i_{z_SAPC} está compuesta, en una estrategia de compensación global, por:

$$i_{z_SAPC} = i_{zH_SAPC} + i_{zU1_SAPC} + i_{z1_SAPC}^{+r} \quad (4.6)$$

donde,

- i_{zH_SAPC} es la corriente instantánea no fundamental por fase demandada por la carga, la cual permite la compensación parcial de $S_{eN\#}$.
- i_{zU1_SAPC} es la corriente instantánea fundamental de desequilibrio por fase demandada por la carga, la cual permite la compensación parcial de $S_{U1\#}$.
- $i_{z1_SAPC}^{+r}$ es la corriente reactiva instantánea fundamental de secuencia positiva demandada por la carga, la cual permite la compensación de Q_1^+ .

La expresión (4.6) corresponde a la corriente de compensación utilizada para compensar de forma global los fenómenos ineficientes existentes en la carga. Esta expresión puede usarse con muy buenos resultados cuando se implementa en un compensador global con capacidad suficiente de potencia para reducir los efectos ineficientes de la carga. La expresión (4.6) distingue cada uno de los términos de corriente que provocan las diferentes potencias ineficientes en la carga. Determinándose dichas corrientes ineficientes se estará en disposición de implementar una compensación selectiva del fenómeno que se desee corregir.

A continuación se deducirán las corrientes de compensación para cada uno de los efectos ineficientes de la carga. Se utilizará como base la teoría de la potencia instantánea expresándose las corrientes deducidas en términos de sus valores instantáneos.

4.2.1. Cálculo de la corriente instantánea no fundamental.

La corriente instantánea no fundamental (i_{zH_SAPC}) permite disminuir los efectos provocados por la demanda de potencia aparente no fundamental ($S_{eN\#}$). i_{zH_SAPC} puede ser obtenida a partir de la medida de la corriente de la carga (i_{z_load}) y de la tensión en el pcc (v_{z_s}). i_{z_load} puede descomponerse en dos términos:

- La corriente instantánea fundamental por fase (i_{z1_load})
- La corriente instantánea no fundamental por fase (i_{zH_load}).

$$i_{z_load} = i_{z1_load} + i_{zH_load} \quad (4.7)$$

Como se presentó en el punto 4.1, mediante el uso de la DFT se obtiene la amplitud ($\sqrt{2} \cdot I_{z1_load}$) y el desfase (β_1) con respecto a v_1 ($\theta_1 = \alpha_1 - \beta_1$) de la corriente instantánea fundamental (i_{z1_load}). i_{z1_load} puede escribirse como sigue:

$$i_{z1_load} = \sqrt{2} I_{z1_load} \text{sen}(\omega t - \varphi_z + \theta_{z1}) \quad (4.8)$$

La corriente que debe generar el compensador para eliminar los efectos de las corrientes armónicas de la carga (i_{zH_SAPC}) debe ser igual a i_{zH_load} , y puede calcularse como sigue:

$$i_{zH_SAPC} = i_{zH_load} = i_{z_load} - i_{z1_load} \quad (4.9)$$

$$i_{zH_SAPC} = i_{z_load} - \sqrt{2} \cdot I_{z1_load} \text{sen}(\omega t - \varphi_z + \theta_{z1}) \quad (4.10)$$

La utilización de las corrientes definidas en (4.10) ocasionan la reducción de $S_{eN\#}$ ya que D_{eV} no podrá cancelarse con un SAPC. Los demás términos de potencia (P_1^+ , Q_1^+ y $S_{U1\#}$) permanecerán en valores similares, e idealmente no se verán afectados por la compensación. La figura 4-6 muestra los flujos de potencia en el sistema eléctrico tras la compensación de parte de las componentes de $S_{eN\#}$, suponiendo que la tensión en el pcc es asimétrica y no lineal.

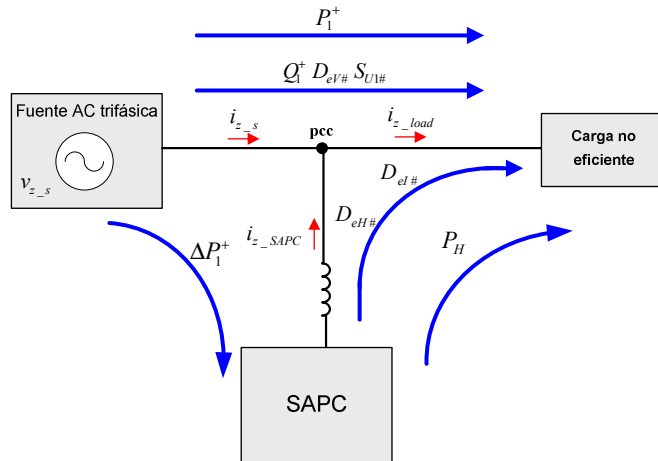


Figura 4-6. Corrientes y potencias en el sistema eléctrico con un SAPC compensando $S_{eN\#}$.

Durante de la compensación, mediante las corrientes propuestas en (4.10), sucede lo siguiente:

- Entre la fuente de tensión AC y la carga: la fuente sigue suministrando a la carga la potencia eficiente P_1^+ y las potencias ineficientes Q_1^+ , $D_{eV\#}$, y $S_{U1\#}$. $D_{eV\#}$ es parte de $S_{eN\#}$ pero no puede ser compensado con el SAPC, ya que representa el término de potencia provocado por tensiones no fundamentales.
- Entre el SAPC y la carga: el SAPC suministra a la carga los términos de $S_{eN\#}$ provocados por las corrientes armónicas de la carga ($D_{eI\#}$ y $D_{eH\#}$). El SAPC suministra P_H , el cual es un término de potencia activa no útil demandado por la carga y que está incluido en $D_{eH\#}$.
- Entre la fuente de tensión AC y el SAPC: la fuente suministra al SAPC ΔP_1^+ , que corresponde a la potencia activa que demanda el SAPC para mantener el bus de continua constante, suministrar P_H a la carga y compensar las pérdidas de potencia internas [87].

El procedimiento de cálculo de i_{zH_SAPC} , no requiere el cálculo de todos los coeficientes de la DFT (sólo requiere el cálculo del coeficiente fundamental). Esta ventaja lo convierte en un método de bajo costo computacional cuando se implementa mediante algoritmos recursivos [97] en un DSP. Sin embargo, con este procedimiento no es posible distinguir cada una de las componentes armónicas que componen a i_{zH_SAPC} . En el caso de que se requiera, se puede calcular la DFT o FFT completa y obtener una reconstrucción de cada una de las componentes armónicas de corriente.

4.2.2. Cálculo de la corriente instantánea fundamental de desequilibrio.

La corriente instantánea fundamental de desequilibrio (i_{zU1_SAPC}) representa los efectos provocados por la demanda de potencia de desequilibrio fundamental ($S_{U1\#}$). i_{zU1_SAPC} se obtiene a partir de la corriente fundamental que demanda la carga (i_{z1_load}). i_{z1_load} es descompuesta con la ayuda de la transformada de Stokvis-Fortesque en tres nuevos términos, los cuales son:

- La corriente instantánea fundamental de secuencia positiva por fase ($i_{z1_load}^+$).
- La corriente instantánea fundamental de secuencia negativa por fase ($i_{z1_load}^-$).
- La corriente instantánea fundamental de secuencia cero por fase ($i_{z1_load}^0$).

$$i_{z1_load} = i_{z1_load}^+ + i_{z1_load}^- + i_{z1_load}^0 \quad (4.11)$$

Las corrientes que identifican los desequilibrios de la carga son $i_{z1_load}^-$, e $i_{z1_load}^0$. Estas son agrupadas en la corriente de desequilibrio fundamental (i_{zU1_load}). i_{z1_load} puede expresarse como sigue:

$$i_{z1_load} = i_{z1_load}^+ + i_{zU1_load} \quad (4.12)$$

El algoritmo de la transformada de Stokvis-Fortesque determina las amplitudes y los desfases de las componentes de secuencia (positiva, negativa, y cero). En este caso, sólo hace falta la componente de secuencia positiva. La amplitud de $i_{z1_load}^+$ es $\sqrt{2}I_{z1_load}^+$ y el desfase es θ_1^+ . $I_{z1_load}^+$ corresponde a la corriente rms fundamental de secuencia positiva. $i_{z1_load}^+$ puede ser escrita como sigue:

$$i_{z1_load}^+ = \sqrt{2}I_{z1_load}^+ \text{sen}(\omega t - \varphi_z + \theta_1^+) \quad (4.13)$$

La corriente que debe generar el compensador para eliminar los efectos de las corrientes desequilibradas de la carga (i_{zU1_SAPC}) debe ser igual a i_{zU1_load} , y puede calcularse como sigue:

$$i_{zU1_SAPC} = i_{zU1_load} = i_{z1_load} - i_{z1_load}^+ \quad (4.14)$$

$$i_{zU1_SAPC} = \sqrt{2} \cdot I_{z1_load} \text{sen}(\omega t - \varphi_z + \theta_{z1}) - \sqrt{2} \cdot I_{z1_load}^+ \text{sen}(\omega t - \varphi_z + \theta_{z1}^+) \quad (4.15)$$

La utilización de las corrientes definidas en (4.15) ocasionan la reducción $S_{U1\#}$ en las corrientes demandadas al sistema eléctrico. Los demás términos de potencia (P_1^+ , Q_1^+ y $S_{eN\#}$) permanecerán en valores similares, e idealmente no se verán afectados por la compensación. La figura 4-7 muestra los flujos de potencia en el sistema tras la compensación de las componentes de $S_{U1\#}$ debido a la circulación de corrientes desequilibradas.

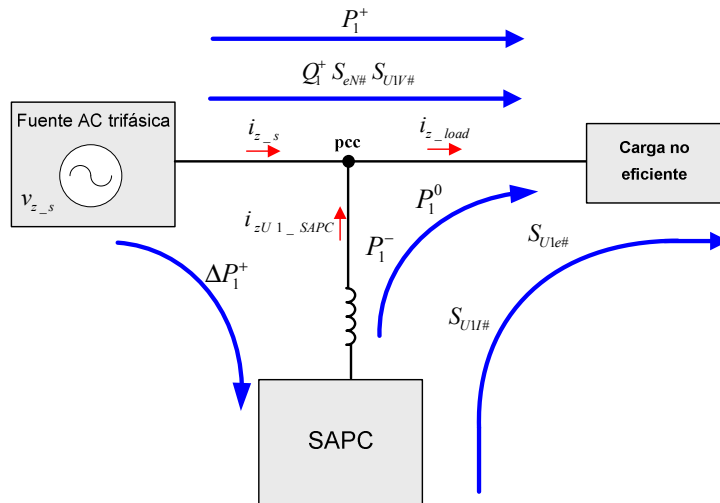


Figura 4-7. Corrientes y potencias en el sistema con un SAPC compensando $S_{U1\#}$.

Durante la compensación mediante las corrientes propuestas en (4.15) sucede lo siguiente:

- Entre la fuente de tensión AC y la carga: la fuente sigue suministrando a la carga la potencia eficiente P_1^+ . Las potencias ineficientes Q_1^+ , $S_{eN\#}$, y $S_{U1V\#}$ también son suministradas por la fuente. $S_{U1V\#}$ es parte de $S_{U1\#}$ pero no puede ser eliminado con el SAPC, ya que representa el término de potencia provocado por tensiones asimétricas.
- Entre el SAPC y la carga: el SAPC suministra a la carga los términos de $S_{U1\#}$ provocados por las corrientes desequilibradas de la carga ($S_{U1I\#}$ y $S_{U1e\#}$). P_1^- y P_1^0 , contenidas dentro de $S_{U1e\#}$, corresponden a los términos de potencia activa no útil que aparecen debido a la coincidencia de tensiones asimétricas y corrientes desequilibradas.
- Entre la fuente de tensión AC y el SAPC: la fuente suministra al SAPC ΔP_1^+ , que corresponde a la potencia activa que demanda el SAPC para mantener el bus de continua constante, poder suministrar P_1^- y P_1^0 a la carga y compensar las pérdidas de potencia internas.

Es de observar que en el cálculo de i_{zU1_SAPC} no hace falta la obtención de las componentes de secuencia negativa y cero, lo que reduce el costo computacional. El procedimiento no permite diferenciar las componentes de secuencia negativa y las componentes de secuencia cero.

Determinar las componentes de corriente fundamental de secuencia cero sirve para reducir las corrientes producto del desequilibrio y que circulan por el neutro.

4.2.3. Cálculo de la componente reactiva de la corriente instantánea fundamental de secuencia positiva.

La compensación de la componente reactiva de la corriente instantánea fundamental de secuencia positiva ($i_{z1_SAPC}^{+r}$) permite disminuir los efectos provocados por la demanda de Q_1^+ por parte de la carga. $i_{z1_SAPC}^{+r}$ puede ser obtenido a partir de la corriente fundamental de secuencia positiva que demanda la carga ($i_{z1_load}^+$). $i_{z1_load}^+$ puede descomponerse en dos partes:

- La componente activa de la corriente instantánea fundamental de secuencia positiva por fase ($i_{z1_load}^{+a}$).
- La componente reactiva de la corriente instantánea fundamental de secuencia positiva por fase ($i_{z1_load}^{+r}$).

$$i_{z1_load}^+ = i_{z1_load}^{+a} + i_{z1_load}^{+r} \quad (4.16)$$

$i_{z1_load}^{+a}$ es la componente de $i_{z1_load}^+$ que se encuentra en fase con el origen o referencia de los ángulos ($v_{z1_s}^+$), y se debe a que la carga demanda P_1^+ . De acuerdo a la teoría de la potencia

instantánea presentada en el Capítulo 2, P_1^+ es considerada como la única potencia activa eficiente, ya que fluye de forma unidireccional desde la red de suministro hacia la carga.

$i_{z1_load}^{+r}$ es la componente de $i_{z1_load}^+$ que se encuentra en cuadratura con el origen o referencia de los ángulos ($\alpha_1^+=0$, $\theta_1^+=\beta_1^+-\alpha_1^+$), y se debe a que la carga demanda Q_1^+ . De acuerdo a la teoría de la potencia instantánea del capítulo 2, Q_1^+ corresponde a un flujo de potencia nulo entre la red de suministro y la carga.

La corriente que debe generar el SAPC para eliminar los efectos de la corriente reactiva de secuencia positiva de la carga ($i_{z1_SAPC}^{+r}$) debe ser igual a $i_{z1_load}^{+r}$, y puede calcularse como sigue:

$$i_{z1_SAPC}^{+r} = i_{zload1}^{+r} \quad (4.17)$$

$$i_{z1_SAPC}^{+r} = \sqrt{2} [I_{z1_load}^+ \text{sen}(\theta_1^+)] \cdot \text{sen}\left(\omega_1 t - \varphi_z - \frac{\pi}{2}\right) \quad (4.18)$$

La generación por parte del SAPC de las corrientes definidas en (4.18) ocasionan la reducción de Q_1^+ en las líneas del generador. Los demás términos de potencia, (P_1^+ , $S_{U1\#}$ y $S_{eN\#}$) permanecerán en valores similares, e idealmente no se verán afectados por la compensación de Q_1^+ . La figura 4-8 muestra los términos de potencia en el sistema tras la compensación de Q_1^+ .

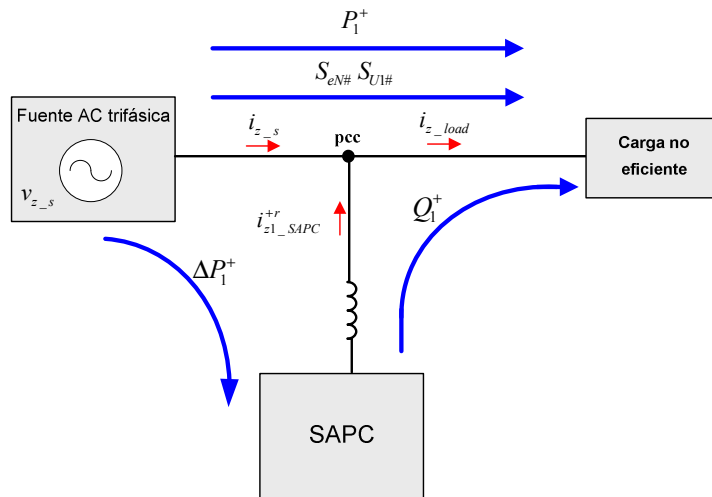


Figura 4-8 Corrientes y potencias en el sistema con un SAPC compensando $S_{U1\#}$.

Durante la compensación mediante las corrientes propuestas en (4.18), la fuente de tensión AC suministra a la carga la potencia eficiente P_1^+ , y las potencias ineficientes $S_{eN\#}$, y $S_{U1\#}$. El SAPC suministra a la carga la potencia ineficiente Q_1^+ . Para satisfacer las pérdidas de potencia del SAPC aparece un pequeño flujo de potencia desde la fuente hacia el SAPC (ΔP_1^+).

4.2.4. Corrientes de compensación para la eliminación de la corriente del neutro. Estrategia de compensación N.

Eliminar la corriente del neutro es una estrategia de compensación selectiva de potencia, en la que se reduce indirectamente y parcialmente $S_{U1\#}$ y $S_{eN\#}$. El principal objetivo de esta estrategia es eliminar la corriente del neutro disminuyendo las pérdidas de potencia en este conductor y previniendo la degradación de la tensión (distorsión, asimetría, y variación de la amplitud) en bornes de la carga (ver capítulo 3).

A continuación se deducirán las corrientes de compensación para reducir la corriente del neutro. Para distinguir esta estrategia de compensación de las demás, esta será llamada estrategia de compensación N. Las corrientes que circulan por el neutro son principalmente corrientes de secuencia cero aunque también pueden existir por este conductor componentes de corriente de secuencia positiva y de secuencia negativa. Las corrientes de secuencia cero se pueden dividir en corrientes fundamentales de secuencia cero (I_1^0) y corrientes no fundamentales de secuencia cero (I_H^0). La corriente I_1^0 se debe principalmente al desequilibrio de la carga lineal y se puede obtener si se le realiza la transformada de Fortesque a las corrientes fundamentales que demanda la carga. En un sistema trifásico a 4 hilos, a cada fase se le atribuye la demanda de I_1^0 , mientras que por el neutro circula una corriente de valor $3I_1^0$. La corriente I_H^0 es propia de las cargas no lineales equilibradas, cuando producen armónicos de corriente de orden $h=3n$ con $n=1,2,3,\dots,\infty$ (armónicos de secuencia cero) y se encuentran en fase. En los sistemas trifásicos a 4 hilos, I_H^0 circula por cada fase, mientras que por el neutro se suman estas corrientes y circula una corriente de valor $3I_H^0$. La aparición de armónicos de corriente de secuencia positiva o negativa desequilibrados (I_H^{+-}) también contribuye a la circulación de corriente por el neutro. A pesar de no ser usual esta situación puede presentarse. Las corrientes que circulan por el neutro son expresadas en términos de las corrientes instantáneas como sigue:

$$i_{n_load} = i_{n1_load}^0 + i_{nH_load} \quad (4.19)$$

donde,

i_{n_load} : es la corriente instantánea del neutro.

$i_{n1_load}^0$: es la corriente instantánea fundamental de secuencia cero del neutro.

i_{nH_load} : es la corriente instantánea no fundamental del neutro.

La corriente i_{nH_load} puede dividirse a su vez en la corriente instantánea no fundamental de secuencia cero del neutro ($i_{nH_load}^0$), y en la corriente instantánea no fundamental de secuencia positiva y/o negativa desequilibrada del neutro ($i_{nH_load}^{+-}$):

$$i_{nH_load} = i_{nH_load}^0 + i_{nH_load}^{+-} \quad (4.20)$$

La corriente i_{n_load} puede ser medida directamente con un sensor de corriente en el conductor de neutro de la carga, o puede obtenerse indirectamente a través de la medida de la corriente de carga de las tres fases (i_{a_load} , i_{b_load} , e i_{c_load}) como sigue:

$$i_{n_load} = i_{a_load} + i_{b_load} + i_{c_load} \quad (4.21)$$

Con la expresión (4.21), las componentes de corriente fundamental de secuencia positiva y negativa se anulan, mientras que las componentes de corriente que están en fase se suman. La ecuación (4.21) reúne todas las componentes de corriente que circulan por el neutro: reúne a la corriente fundamentales de secuencia cero (I_1^0), a las corrientes no fundamentales de secuencia cero (I_H^0) equilibradas, e inclusive a las corrientes no fundamentales de secuencia positiva y negativa desequilibradas (I_H^{+0} , e I_H^{-0}).

La corriente que debe generar el SAPC en su salida (i_{zn_SAPC}) para eliminar de forma global las corrientes del neutro está dada por:

$$i_{zn_SAPC} = \frac{1}{3} i_{n_load} \quad (4.22)$$

A continuación se deducirán las corrientes de compensación para cada corriente que circula por el neutro. Se utilizará como base la teoría de la potencia instantánea, así que, las corrientes deducidas serán expresadas en términos de sus valores instantáneos.

4.2.4.1. Cálculo de la componente de corriente instantánea fundamental que circula por el neutro.

La corriente instantánea fundamental que circula por el neutro ($i_{n1_load}^0$) se obtiene a partir de la medida o cálculo de la corriente del neutro (i_{n_load}). Se le debe aplicar a i_{n_load} la Transformada Discreta de Fourier (DFT). Debido a que por el neutro sólo circulan componentes de secuencia cero (sin rotación y en fase), con la DFT se obtiene directamente la amplitud de $i_{n1_load}^0$ ($\sqrt{2} \cdot I_{n1_load}^0$) y su fase (β_{n1}^0) con respecto a v_1^+ ($\theta_{n1}^0 = \alpha_1^+ - \beta_{n1}^0$). El término $I_{n1_load}^0$ es el valor rms de la corriente fundamental de secuencia cero que circula por la carga. $i_{n1_load}^0$ puede escribirse como sigue:

$$i_{n1_load}^0 = \sqrt{2} I_{n1_load}^0 \text{sen}(\omega t + \theta_{n1}^0) \quad (4.23)$$

Si se dispone de un SAPC con un inversor de 4 ramas (ramas para las fases a , b , c y el neutro), es posible utilizar directamente la expresión (4.23) para calcular las corrientes de compensación a inyectar por la rama del neutro. Sin embargo, debido a que la configuración de SAPC utilizada en esta tesis contiene un inversor de 3 ramas, se debe obtener una corriente instantánea para cada fase activa del inversor y que retorne por el neutro ($i_{zn1_SAPC}^0$), esta corriente puede calcularse como sigue:

$$i_{zn1_SAPC}^0 = \frac{1}{3} i_{n1_load}^0 \quad (4.24)$$

La utilización de las corrientes definidas en (4.24) ocasiona la compensación parcial de $S_{U1\#}$ anulando la componente fundamental de la corriente del neutro. Los demás términos de potencia (P_1^+ , Q_1^+ y $S_{eN\#}$) permanecerán en valores similares, e idealmente no se verán afectados por la compensación.

4.2.4.2. Cálculo de las componentes de corriente instantáneas no fundamentales que circulan por el neutro.

Las corrientes instantáneas no fundamentales que circulan por el neutro (i_{nH_load}) se obtienen a partir de la medida o cálculo de i_{n_load} y del cálculo de $i_{n1_load}^0$ para un periodo completo de la señal fundamental. i_{nH_load} contiene todas las componentes de corriente no fundamental que circulan por el neutro y está dada por:

$$i_{nH_load} = i_{n_load} - i_{n1_load}^0 \quad (4.25)$$

Si se dispone de un SAPC con un inversor de 4 ramas (ramas para las fases a , b , c y el neutro), es posible utilizar directamente la expresión (4.25) para calcular las corrientes de compensación a inyectar por la rama del neutro. Sin embargo, debido a que la configuración de SAPC utilizada en esta tesis contiene un inversor de 3 ramas, se debe obtener una corriente instantánea para cada fase activa del SAPC y que retorne por el neutro (i_{znH_SAPC}), corriente puede calcularse como sigue:

$$i_{znH_SAPC} = \frac{1}{3} i_{nH_load} \quad (4.26)$$

La expresión (4.26) sirve para eliminar las componentes armónicas de corriente equilibrada y de secuencia cero que circulan por el neutro (I_{nH}^0), sirviendo también para eliminar las componentes armónicas de corriente desequilibrada de secuencia positiva y negativa que circulan por el neutro (I_{nH}^{+0} , e I_{nH}^{-0}). La utilización de las corrientes definidas en (4.26) ocasionan la compensación parcial de $S_{eN\#}$. Los demás términos de potencia (P_1^+ , Q_1^+ y $S_{U1\#}$) permanecerán en valores similares, e idealmente no se verán afectados por la compensación.

Es posible obtener todas las componentes de la corriente i_{znH_SAPC} , sin embargo, para esto, se requiere del cálculo de la DFT para todas las componentes armónicas y su descomposición mediante la transformada de Stokvis-Fortesque.

4.3. SAPC's con limitación de potencia.

En condiciones ideales y óptimas de funcionamiento, las corrientes ineficientes demandadas por la carga son compensadas en las redes de suministro eléctrico con el SAPC. Sin embargo, en condiciones reales, los SAPC's tienen un límite en la potencia destinada a la compensación. El límite de potencia del SAPC lo establece la potencia aparente máxima del inversor VSI (según los semiconductores utilizados), la inductancia de salida en el lado de AC, y las protecciones eléctricas incluidas.

Cuando se alcance el límite de potencia del SAPC, se debe implementar una estrategia de compensación que garantice la máxima transferencia de potencia ineficiente desde el SAPC hacia la carga y que optimice al máximo el sistema eléctrico de distribución de potencia.

Para determinar si se ha llegado al límite de potencia que tiene el SAPC (S_{SAPC}), es necesario definir un nuevo término que contenga todas las potencias ineficientes de la carga (S_{inef_load}) y que el SAPC debería poder compensar. De acuerdo a la IEEE Std. 1459-2010, las potencias ineficientes que demanda la carga son Q_1^+ , $S_{U1\#}$, $S_{eN\#}$. Todas estas potencias, junto con P_1^+ , forman parte de la potencia efectiva aparente ($S_{e\#}$) demandada por la carga según las condiciones de operación en el pcc. $S_{e\#}$ puede escribirse en términos de la nueva potencia aparente ineficiente de la carga (S_{inef_load}) y P_1^+ como sigue:

$$S_{e\#}^2 = (P_1^+)^2 + S_{inef_load}^2 \quad (4.27)$$

S_{inef_load} es definido para englobar todas las potencias ineficientes de la carga y está dado por:

$$S_{inef_load}^2 = \sqrt{(Q_1^+)^2 + (S_{U1\#})^2 + (S_{eN\#})^2} \quad (4.28)$$

Cuando la potencia aparente del SAPC supere al conjunto de potencias ineficientes a compensar ($S_{SAPC} > S_{inef_load}$), el SAPC puede realizar una compensación global de todos los fenómenos ineficientes. En este caso, las corrientes de compensación global y selectiva definidas en las secciones 4.1 y 4.2 pueden usarse indiferentemente para la compensación.

En el caso contrario, cuando la potencia del SAPC no supera el conjunto de potencias ineficientes a compensar ($S_{SAPC} < S_{inef_load}$), las corrientes de compensación definidas en las secciones 4.1 y 4.2 deben ser redefinidas, ya que, sólo una parte de S_{inef_load} va a poder ser compensada por el SAPC.

A continuación se plantean tres opciones:

- La estrategia de compensación global modificada: consiste en escalar o reducir las corrientes de compensación que debe inyectar el SAPC tomando como base las corrientes definidas en la estrategia de compensación global.

- La estrategia de compensación selectiva: consiste en elegir las corrientes ineficientes que debe inyectar el SAPC sin que se superé en ningún momento su capacidad nominal.
- La estrategia de compensación selectiva para la compensación de las corrientes del neutro de la instalación.

4.3.1. Corrientes de compensación para SAPC's con estrategia de compensación global modificada y con limitación de potencia.

La corriente de compensación global, deducida en la ecuación (4.5), sirve para reducir las potencias ineficientes demandadas por la carga cuando $S_{SAPC} > S_{inef_load}$. Debido a la limitación de potencia del SAPC, las corrientes de la expresión (4.5) se deben escalar cuando $S_{SAPC} < S_{inef_load}$. Para escalarlas se ha definido un nuevo coeficiente para cada fase (K_{zG}), con el cual es posible controlar el porcentaje de corriente de compensación a inyectar en cada fase. El coeficiente de escalado K_{zG} puede variar entre 0 y 1. Se plantean tres situaciones posibles según el valor de K_{zG} :

- Si $K_{zG}=1$, el SAPC compensa totalmente las corrientes ineficientes de la carga, es decir trabaja en modo global.
- Si $K_{zG}=0$, el SAPC anula totalmente la corriente de compensación a inyectar, es decir el SAPC no compensa.
- Si $0 < K_{zG} < 1$, el SAPC sólo inyecta una parte de la corriente ineficiente que demanda la carga, es decir el SAPC trabaja en modo global modificado.

La nueva corriente de compensación, definida a partir de la ecuación (4.5), para la estrategia de compensación global modificada es:

$$i_{z_SAPC_G} = K_{zG} \cdot i_{z_SAPC} = K_{zG} \cdot (i_{z_load} - i_{z1_load}^{+a}) \quad (4.29)$$

4.3.2. Corrientes de compensación para SAPC's con estrategia de potencia selectiva y con limitación de potencia.

Las corrientes correspondientes a las ecuaciones (4.10), (4.15), y (4.18) pueden utilizarse para reducir cada una de las potencias ineficientes existentes en la carga. En este apartado, se propondrá una expresión para la reducción de la combinación de las diferentes potencias ineficientes. Retomando la ecuación (4.6), la corriente de compensación global que distingue los diferentes fenómenos ineficientes de la carga es:

$$i_{z_SAPC} = i_{zH_SAPC} + i_{zU1_SAPC} + i_{z1_SAPC}^{+r} \quad (4.30)$$

Las corrientes de compensación que componen (4.30), y que sirven para compensar individualmente los fenómenos ineficientes de la carga, son resumidas en la siguiente tabla:

Fenómeno	Corrientes de Compensación
Desfase (Ec. 4.18)	$i_{z1_SAPC}^{+r} = \sqrt{2} [I_{z1_load}^+ sen(\theta_1^+)] \cdot sen\left(\omega_1 t - \varphi_z - \frac{\pi}{2}\right)$
Desequilibrio (Ec. 4.15)	$i_{zU1_SAPC} = \sqrt{2} \cdot I_{z1_load}^+ sen(\omega_1 t - \varphi_z + \theta_1) - \sqrt{2} \cdot I_{z1_load}^+ sen(\omega_1 t - \varphi_z + \theta_{z1}^+)$
Distorsión (Ec. 4.10)	$i_{zH_SAPC} = i_{z_load} - \sqrt{2} \cdot I_{z1_load}^+ sen(\omega_1 t - \varphi_z + \theta_1)$

Tabla 4-1. Corrientes de compensación basadas en la IEEE Std. 1459.

Para compensar individualmente cada fenómeno ineficiente o la combinación de algunos de ellos, es necesario modificar la ecuación (4.30) añadiendo coeficientes de escalado. Para esto se han definido parámetros con el fin de controlar el porcentaje de cada corriente de compensación a inyectar. Cuando se controla el coeficiente de escalado, se controla el porcentaje de cada una de las corrientes ineficientes de la carga que pueden ser compensadas y se entra en el modo de compensación selectiva. Los coeficientes para realizar el escalado pueden variar entre 0 y 1. El valor de 0 indica que se anula totalmente la corriente de compensación a inyectar. El valor de 1 indica que la corriente de compensación se inyecta totalmente a la carga. Los coeficientes de escalado por fase para cada una de las corrientes de compensación para la tabla 4-1 son definidos como sigue:

- K_{zH} : coeficiente para realizar el escalado de i_{zH_SAPC} ($0 \leq K_{zH} \leq 1$).
- K_{zU} : coeficiente para realizar el escalado de i_{zU1_SAPC} ($0 \leq K_{zU} \leq 1$).
- K_{zQ} : coeficiente para realizar el escalado de $i_{z1_SAPC}^{+r}$ ($0 \leq K_{zQ} \leq 1$).

Añadiendo en (4.30) los coeficientes de escalado, las corrientes del SAPC en modo selectivo se definen como:

$$i_{z_SAPC_S} = K_{zH} \cdot i_{zH_SAPC} + K_{zU} \cdot i_{zU1_SAPC} + K_{zQ} \cdot i_{z1_SAPC}^{+r} \quad (4.31)$$

De esta forma, el SAPC puede mitigar los fenómenos ineficientes de desfase, desequilibrio, y distorsión armónica, de forma independiente o combinados, llegando incluso a incluir todos los términos y por tanto funcionar como SAPC global.

En [92] se incluyen resultados experimentales y de simulación donde se utilizan unos coeficientes de escalado por fase con una metodología semejante a la metodología propuesta en esta sección. Sin embargo, los autores no explican criterio o algoritmo alguno para asignar valores a estos coeficientes. En la sección 4.4 se propondrán algoritmos para asignar

valores a los coeficientes de escalado y en el capítulo 5 se propondrán criterios para establecer el orden de compensación de las potencias ineficientes que demanda la carga.

4.3.3. Corrientes de compensación para SAPC's para la reducción de la corriente del neutro y con limitación de potencia.

Las corrientes correspondientes a las ecuaciones (4.24), y (4.26) pueden utilizarse para reducir cada una de las corrientes que circulan por el neutro. En este apartado, se propondrá una expresión para la reducción de la combinación de las diferentes corrientes del neutro. Utilizando las ecuaciones (4.24) y (4.26), la corriente para compensar la corriente del neutro y que distingue los diferentes tipos de corriente es:

$$i_{zn_SAPC} = i_{zn1_SAPC}^0 + i_{znH_SAPC} \quad (4.325)$$

Las corrientes de compensación que componen (4.32), y que sirven para compensar individualmente las corrientes que circulan por el neutro, son resumidas en la siguiente tabla:

Fenómeno	Corrientes de Compensación
Desequilibrio. (Ec. 4.24)	$i_{zn1_SAPC}^0 = \frac{1}{3} \sqrt{2} I_{n1_load}^0 \text{sen}(\omega_1 t + \theta_{n1})$
Distorsión y distorsión desequilibrada. (Ec. 4.26)	$i_{znH_SAPC} = \frac{1}{3} (i_{n_load} - \sqrt{2} I_{n1_load}^0 \text{sen}(\omega_1 t + \theta_{n1}))$

Tabla 4-2. Corrientes de compensación para la reducción de las corrientes del neutro.

Para compensar individualmente cada componente de la corriente que circula por el neutro o la combinación de algunas de ellas (si existe limitación de potencia), es necesario modificar la ecuación (4.32) añadiendo coeficientes de escalado. Los coeficientes de escalado por fase para cada una de las corrientes de compensación de la tabla 4-2 son definidos como sigue:

- $K_{I_1^0}$: coeficiente para realizar el escalado de $i_{zn1_SAPC}^0$ ($0 \leq K_{I_1^0} \leq 1$).
- $K_{I_{nH}}$: coeficiente para realizar el escalado de i_{znH_SAPC} ($0 \leq K_{I_{nH}} \leq 1$).

Añadiendo en (4.32) los coeficientes de escalado, las corrientes del SAPC en modo selectivo para la compensación del neutro se definen como:

$$i_{zn_SAPC} = K_{I_1^0} \cdot i_{zn1_SAPC}^0 + K_{I_{nH}} \cdot i_{znH_SAPC} \quad (4.33)$$

De esta forma, el SAPC puede mitigar las corrientes que circulan por el neutro causadas por el desequilibrio, y la no linealidad de la carga, de forma independiente o combinada. Si después de utilizar la estrategia de compensación N, aún queda potencia disponible en el SAPC, es

posible utilizarlo para inyectar otras corrientes ineficientes que demande la carga reduciendo aún más las potencias ineficientes que suministra la red eléctrica.

4.4. Algoritmos para el escalado de las corrientes de compensación en SAPC's.

Como cualquier dispositivo eléctrico y electrónico todos los SAPC's tienen un límite de corriente impuesto por la corriente nominal del convertidor de potencia, los conductores, las protecciones, y los demás elementos usados en su implementación. Antes de que las corrientes de compensación superen los límites del SAPC estas deben ser escaladas o reducidas. Para escalar las corrientes de compensación eficazmente se deben tener en cuenta varios aspectos:

- Las corrientes de compensación deben circular entre el SAPC y la carga, y nunca circular entre el SAPC y el sistema eléctrico de potencia.
- Las corrientes de compensación nunca deben empeorar la calidad del suministro eléctrico del sistema de potencia.
- La transferencia de potencia desde el SAPC a la carga debe ser la máxima posible y muy cercana a la potencia nominal del SAPC.

En la presente sección, se propondrán algoritmos para realizar el escalado de las corrientes de compensación. Se utilizará como base los aspectos descritos previamente. En primer lugar, se propondrán diferentes algoritmos para escalar las corrientes de compensación de los SAPC's globales, analizando las ventajas e inconvenientes de cada una de las propuestas expuestas. Posteriormente, aprovechando los resultados en el escalado de los SAPC's globales, se propondrá el algoritmo para encontrar las corrientes de compensación escaladas cuando se realiza la compensación selectiva de ineficiencias.

Las corrientes máximas a entregar por el SAPC se han limitado a diferentes escalas según el algoritmo de compensación utilizado para poder hacer coincidir simulaciones y casos experimentales. No se ha podido mantener el mismo valor para todos los casos debido a que algunas secuencias de compensación provocaban el disparo de las protecciones eléctricas existentes en los laboratorios donde se ha desarrollado la parte experimental.

4.4.1. Algoritmos para el escalado de las corrientes de compensación global.

La mayoría de los trabajos publicados relacionados con SAPC's utilizan estrategias de compensación globales para reducir los efectos de las potencias ineficientes de la carga sin llegar a plantearse la situación en que $S_{SAPC} < S_{inef_load}$ [87], [92]-[96]. Cuando se supera el límite de potencia del SAPC, las corrientes de compensación reducen parcialmente estos efectos. En la presente sección, se analizarán tres algoritmos para escalar las corrientes de compensación cuando estas superan los límites de corriente del SAPC y se determinará cual es el algoritmo de escalado que mejores prestaciones ofrece.

4.4.1.1. Primer algoritmo para realizar el escalado de las corrientes de compensación global.

El algoritmo analizado en esta sección parte de la expresión (4.5), en la cual a i_{z_SAPC} se le aplica un coeficiente de escalado K_{zG} . En este caso, K_{zG} es calculado en cada nueva muestra adquirida, por lo que, es un coeficiente variable en el tiempo. Definiendo n para indicar la n -ésima muestra adquirida, el coeficiente de escalado para cada muestra se puede designar por K_{zGn} . Para poder calcular K_{zGn} , en cada nueva muestra adquirida, se utiliza el método de la ventana deslizante [98]. De acuerdo a las anteriores consideraciones, para este caso, la ecuación (4.5) es rescrita como sigue:

$$i_{z_SAPC_G} = K_{zGn} \cdot i_{z_SAPC} \quad (4.34)$$

El algoritmo utilizado para calcular K_{zGn} es descrito a continuación y puede verse en el flujograma de la figura 4-9:

1. Para poder iniciar la ejecución del algoritmo, se mide y almacena en el buffer circular un periodo completo de las corrientes de la carga (i_{z_load}).
2. Se obtienen las corrientes de compensación en el último instante de tiempo muestreado y teniendo en cuenta la información del último periodo de tiempo almacenado, de acuerdo al apartado 4.1 de la tesis.
3. Se compara el valor máximo nominal de corriente del SAPC ($I_{MAXSAPC}$) con i_{z_SAPC} para cada una de las fases en cada muestra adquirida. $I_{MAXSAPC}$ es un valor constante y es el máximo valor de corriente instantánea que puede generar el SAPC.
4. En el caso de que $i_{z_SAPC} \leq I_{MAXSAPC}$, no se requiere el escalado de i_{z_SAPC} por lo que a K_{zGn} se le asigna el valor de 1, de lo contrario ($i_{z_SAPC} > I_{MAXSAPC}$) se calculan para cada fase los coeficientes de escalado:

$$K_{zGn} = \frac{I_{MAXSAPC}}{i_{z_SAPC}} \quad (4.35)$$

5. Se asigna a K_{Gn} el valor del menor coeficiente de entre los coeficientes calculados para las tres fases: $K_{Gn} = \min(K_{aGn}, K_{bGn}, K_{cGn})$.
6. Los coeficientes de escalado de cada fase se hacen iguales al coeficiente de valor mínimo calculado en el paso anterior: $K_{aGn} = K_{bGn} = K_{cGn} = K_{Gn}$.
7. Se realiza el escalado de la corriente que ha de generar el SAPC en su salida (i_{z_SAPC}) en las tres fases de acuerdo a la ecuación:

$$i_{z_SAPC_G} = K_{zGn} \cdot i_{z_SAPC} \quad (4.36)$$

8. Se obtiene una nueva muestra y se almacena en el buffer circular con ayuda del método de la ventana deslizante. Se retorna al paso 2 del algoritmo.

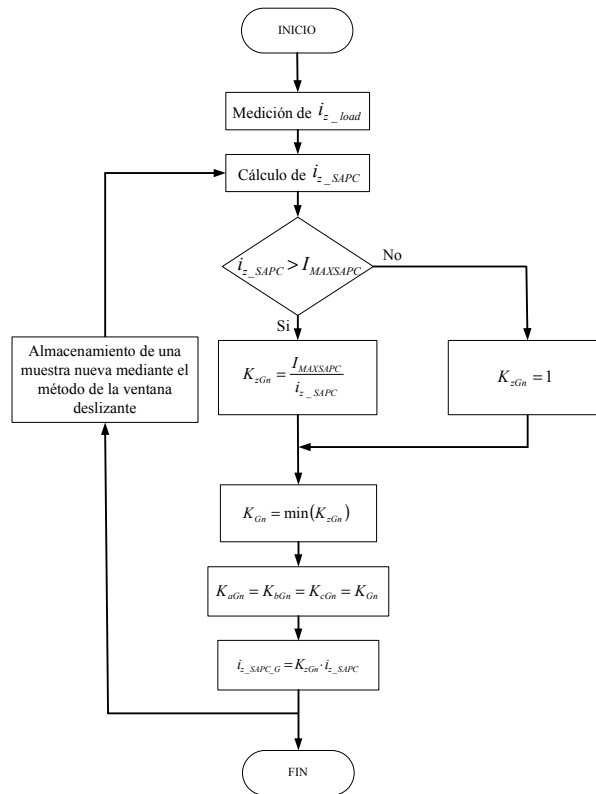


Figura 4-9. Flujoograma del primer algoritmo para realizar el escalado de las corrientes de compensación global.

Para verificar el funcionamiento del algoritmo planteado se realizaron simulaciones en Matlab-Simulink. Con el modelo de la figura 4-10 se obtienen las corrientes de la red tras la compensación de las corrientes ineficientes de la carga siguiendo el flujoograma expuesto en la figura 4-9.

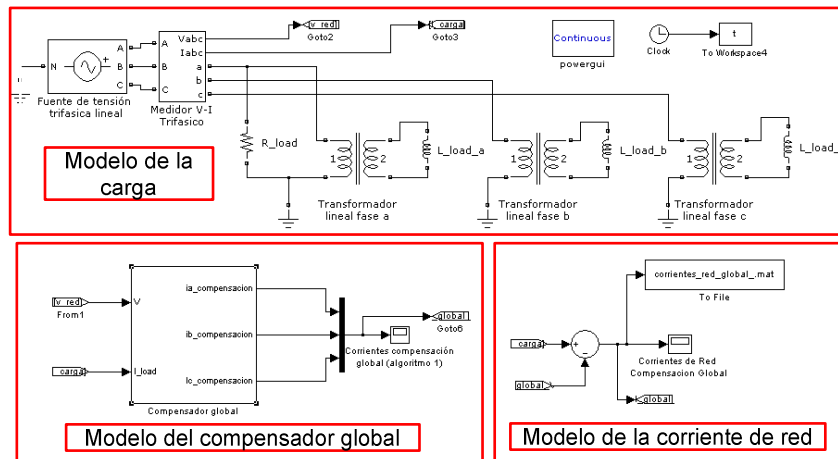


Figura 4-10. Modelo de Matlab-Simulink de un compensador global del corrientes ineficientes bajo estudio.

El modelo de la figura 4-10 se divide en tres partes. En la parte superior se encuentra el modelo de la carga del sistema eléctrico, en la parte inferior izquierda se encuentra el modelo del compensador global utilizado para compensar las corrientes ineficientes de la carga, y en la parte inferior derecha se encuentra el modelo de las corrientes de la red tras la compensación. Cada uno de estos modelos será explicado a continuación.

Modelo de la carga: la carga incluye los fenómenos de desequilibrio y de desfase. El desequilibrio es ocasionado principalmente por la conexión de una resistencia en la fase *a* (R_{load}), y el desfase es ocasionado principalmente por la conexión de transformadores lineales con carga inductiva (L_{load_a} , L_{load_b} , L_{load_c}). El transformador con carga inductiva es usado para aumentar la impedancia inductiva incrementando la demanda de potencia reactiva demandada por la carga. Esta carga es usada en las simulaciones de la tesis ya que corresponde a la carga utilizada en la implementación de la parte experimental. En las siguientes tablas se resumen los valores de los parámetros de la carga utilizados en la simulación.

<i>°Desequilibrio (Resistencia en la fase a).</i>	
$R_{load} = 65.9 \Omega$	

Tabla 4-3. Carga resistiva desequilibrada

<i>(Desfase) Transformador lineal.</i>		
$S_{nominal} = 1000 \text{ VA}$		$f = 50 \text{ Hz}$
<i>Devanado primario.</i>		
$V_{rms} = 125 \text{ V}$	$r_{trafo_p} = 0.48 \Omega$	$l_{trafo_p} = 5.1 \text{ mH}$

Devanado secundario.		
$V_{rms} = 24 \text{ V}$	$r_{trafo_s} = 0.49 \ \Omega$	$l_{trafo_s} = 5.1 \text{ mH}$
Rama de magnetización.		
$r_{trafo_m} = 24200 \ \Omega$		$l_{trafo_m} = 64.19 \text{ H}$
(Desfase) Carga transformador lineal.		
$L_{load_a} = 2.48 \text{ mH}$	$L_{load_b} = 2.48 \text{ mH}$	$L_{load_c} = 2.57 \text{ mH}$

Tabla 4-4. Carga inductiva equilibrada (Desfase).

La carga es alimentada mediante un sistema de tensiones trifásico simétrico de frecuencia fundamental. El voltaje rms línea-neutro es de 125 V, la frecuencia es de 50 Hz, la fase inicial para la fase z (φ_z) es $\varphi_a=0$, $\varphi_b=2\pi/3$, y $\varphi_c=4\pi/3$ ($z=a,b,c$). La representación de la tensión de suministro en cada instante de tiempo y para la fase z ($v_z(t)$) puede modelarse mediante la siguiente expresión:

$$v_z(t) = \sqrt{2} \cdot 125 \text{sen}(2 \cdot \pi \cdot 50 \cdot t - \varphi_z) \quad (4.37)$$

Los valores de las corrientes y las tensiones son medidas con ayuda de un “Medidor V-I Trifásico”. Las formas de onda de corriente de la carga simuladas pueden verse en la figura 4-11. Los valores rms de las componentes armónicas de la corriente de la carga y sus THD_I 's pueden verse en la tabla 4-5.

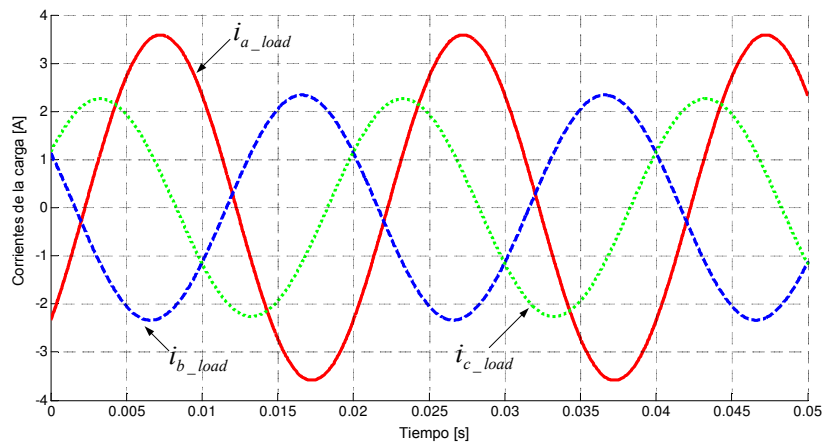


Figura 4-11. Corrientes demandadas por la carga.

$I_{a1} = 2.54 \text{ A}$	$I_{a3} = 0 \text{ A}$	$I_{a5} = 0 \text{ A}$	$I_{a7} = 0 \text{ A}$	$I_{a9} = 0 \text{ A}$	$I_{a11} = 0 \text{ A}$	$I_{a13} = 0 \text{ A}$	$THD_{Ia} = 0\%$
$I_{b1} = 1.65 \text{ A}$	$I_{b3} = 0 \text{ A}$	$I_{b5} = 0 \text{ A}$	$I_{b7} = 0 \text{ A}$	$I_{b9} = 0 \text{ A}$	$I_{b11} = 0 \text{ A}$	$I_{b13} = 0 \text{ A}$	$THD_{Ib} = 0\%$
$I_{c1} = 1.60 \text{ A}$	$I_{c3} = 0 \text{ A}$	$I_{c5} = 0 \text{ A}$	$I_{c7} = 0 \text{ A}$	$I_{c9} = 0 \text{ A}$	$I_{c11} = 0 \text{ A}$	$I_{c13} = 0 \text{ A}$	$THD_{Ic} = 0\%$
$I_{n1} = 1.85 \text{ A}$	$I_{n3} = 0 \text{ A}$	$I_{n5} = 0 \text{ A}$	$I_{n7} = 0 \text{ A}$	$I_{n9} = 0 \text{ A}$	$I_{n11} = 0 \text{ A}$	$I_{n13} = 0 \text{ A}$	$THD_{In} = 0\%$
$I_a = 2.54 \text{ A}$		$I_b = 1.65 \text{ A}$		$I_c = 1.60 \text{ A}$		$I_n = 0 \text{ A}$	
$I_1^+ = 1.76 \text{ A}$			$I_1^{+\alpha} = 0.66 \text{ A}$			$I_1^{+r} = 1.63 \text{ A}$	
$I_1^- = 0.65 \text{ A}$			$I_1^0 = 0.61 \text{ A}$			$I_{U1\#} = 0.89 \text{ A}$	
$I_{aH} = 0 \text{ A}$		$I_{bH} = 0 \text{ A}$		$I_{cH} = 0 \text{ A}$		$I_{nH} = 0 \text{ A}$	
$I_{e\#} = 1.98 \text{ A}$		$I_{e1\#} = 1.98 \text{ A}$		$I_{eH\#} = 0 \text{ A}$		$THD_{e\#} = 0\%$	

Tabla 4-5 Corrientes de la carga y su $THD_{e\#}$.

En la tabla 4-6 se encuentran resumidos las principales magnitudes de potencia definidas en la IEEE Std. 1459-2010 demandadas por la carga.

$S_{e\#} = 741.64 \text{ VA}$					
$S_{e1\#} = 741.64 \text{ VA}$			$S_{eN\#} = 0 \text{ VA}$		
$S_1^+ = 661.49 \text{ VA}$		$S_{U1\#} = 372.18 \text{ VA}$	$D_{eH\#} = 0 \text{ VA}$	$S_{eH\#} = 0 \text{ VA}$	$D_{eV\#} = 0 \text{ VA}$
$P_1^+ = 247.33 \text{ W}$	$Q_1^+ = 613.51 \text{ var}$				

Tabla 4-6. Magnitudes de potencia demandadas por la carga.

Modelo del compensador global: el bloque de simulación correspondiente al compensador global fue creado mediante el uso de S-functions. Las entradas del bloque son las medidas de los voltajes de la red y las corrientes de la carga. Los voltajes provienen del tag “Goto 2” y las corrientes provienen del tag “Goto 3”. Las salidas corresponden a las corrientes de compensación que deben ser inyectadas por el compensador para proveer a la carga las corrientes ineficientes que demanda. La S-function fue programada para que calcule las corrientes de compensación con el algoritmo expuesto en la presente sección. Para el análisis se le ha impuesto un límite de 1 A rms a las corrientes de compensación del SAPC.

Modelo de la corriente de red: para modelar la corriente de la red se utilizó el bloque suma que contiene una terminal que suma (+) y una terminal que resta (-). La entrada al terminal “+” es la corriente de la carga que proviene del tag “Goto 3”, la entrada a la terminal “-” es la corriente generada por el compensador que proviene del tag “Goto 6”, y la salida del bloque suma es la corriente que suministra la red eléctrica tras la compensación.

Análisis del algoritmo para la compensación global: el algoritmo de la S-function del compensador se ejecuta de acuerdo a los pasos descritos en esta sección. En el paso 2 se obtienen las corrientes de compensación necesarias para que el SAPC pueda compensar todas las corrientes ineficientes demandadas por la carga. Para este caso particular, estas corrientes de compensación incluyen los fenómenos de desfase y desequilibrio y pueden verse para un periodo completo de la señal fundamental en la figura 4-12 (i_{a_SAPC} , i_{b_SAPC} , e i_{c_SAPC}).

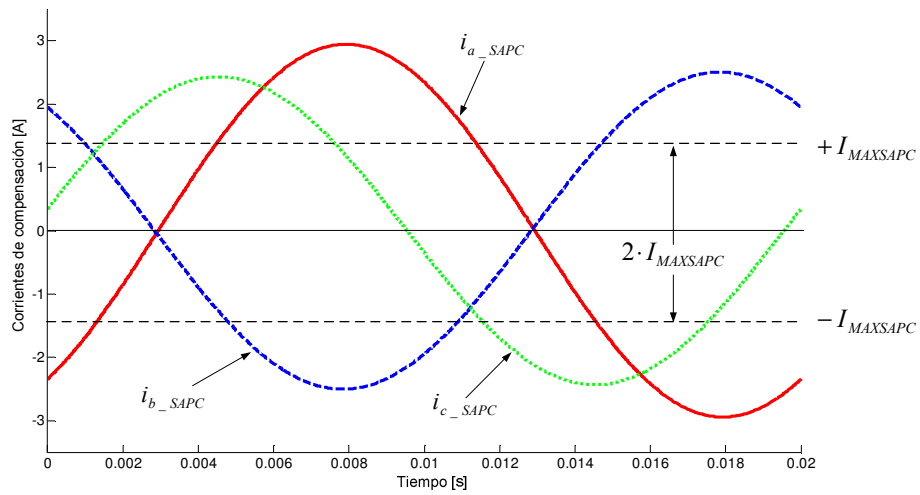


Figura 4-12. Corrientes de compensación que debería generar el SAPC.

Las líneas horizontales punteadas corresponden al límite de corriente máxima del SAPC ($I_{MAXSAPC} = \pm 1 \times \sqrt{2} = \pm 1.41 A_{pico}$) establecido. Las corrientes i_{a_SAPC} , i_{b_SAPC} , e i_{c_SAPC} superan los límites ($I_{MAXSAPC}$) por lo que deben ser escaladas. En la parte superior de la figura 4-13 se pueden ver las corrientes de compensación escaladas, mientras que en la parte inferior pueden verse en trazo discontinuo los coeficientes de escalado para las fases a , b , y c (K_{aGn} , K_{bGn} , K_{cGn}) y el coeficiente de valor mínimo (K_{Gn}) representado en un trazo continuo de mayor grosor.

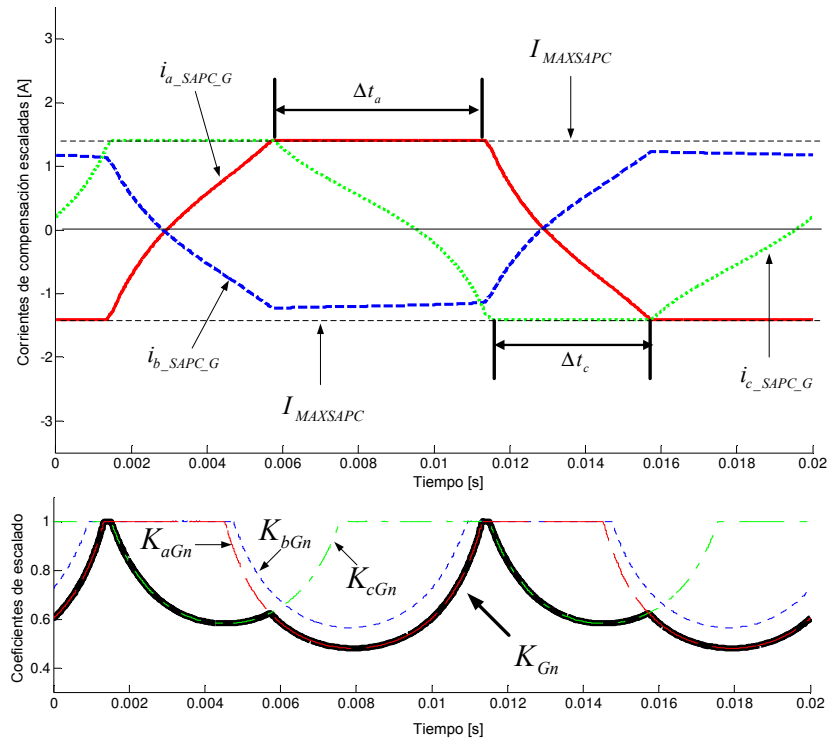


Figura 4-13. Corrientes de compensación escaladas que genera el SAPC junto a la evolución del coeficiente de escalado.

Tras el escalado las nuevas corrientes de compensación ($i_{a_SAPC_G}$, $i_{b_SAPC_G}$, e $i_{c_SAPC_G}$) no superan $I_{MAXSAPC}$. Las corrientes de compensación son escaladas en varios intervalos del periodo de tiempo. En la figura 4-13 se destacan, por ejemplo, los intervalos Δt_a y Δt_c . El intervalo Δt_a corresponde al intervalo donde i_{a_SAPC} supera el límite de corriente del compensador. En este intervalo, i_{a_SAPC} es escalada de tal forma que su valor se recorta a $I_{MAXSAPC}$, mientras que las corrientes i_{b_SAPC} , e i_{c_SAPC} también son escaladas en la misma proporción y por lo tanto su valor también se reduce. En el intervalo Δt_c , la corriente es i_{c_SAPC} la que se recorta a $I_{MAXSAPC}$ mientras que las corrientes i_{a_SAPC} , e i_{b_SAPC} son reducidas en la misma proporción. El coeficiente K_{Gn} es aplicado en el escalado de las tres corrientes de compensación. K_{Gn} es un coeficiente variable en el tiempo y su variación depende de las corrientes de compensación. En el intervalo Δt_a , el coeficiente K_{Gn} depende de los valores instantáneos de i_{a_SAPC} , mientras que en el intervalo Δt_c , el coeficiente K_{Gn} depende de la evolución de i_{c_SAPC} . En la figura 4-14 puede verse las corrientes de la red antes y durante la compensación.

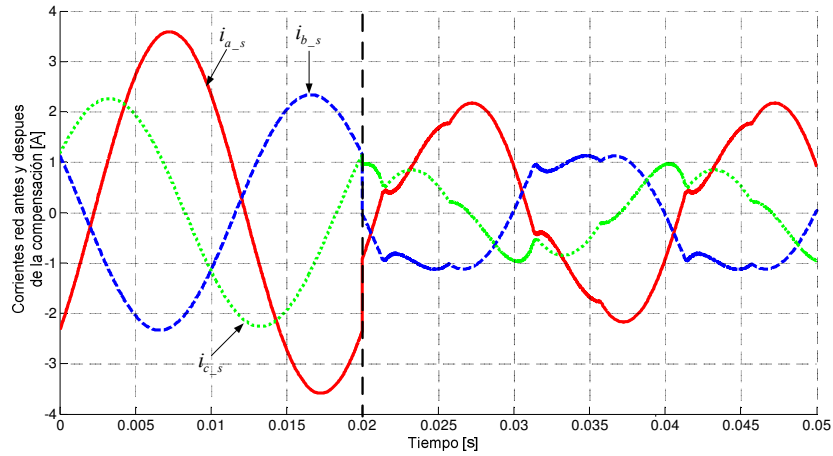


Figura 4-14. Corrientes de red antes y después de la puesta en marcha del SAPC.

La figura 4-14 está dividida en dos por una línea vertical discontinua en el instante de tiempo de 0.02 s. En la parte izquierda se pueden ver las corrientes de red antes de la compensación mientras que en la parte derecha se pueden ver las corrientes de red después de la compensación. Tras la compensación el valor máximo de las corrientes de red se reduce considerablemente, sin embargo, su forma de onda no es senoidal. En la figura 4-15 se muestra el espectro armónico de las corrientes rms de la red antes y durante la compensación.

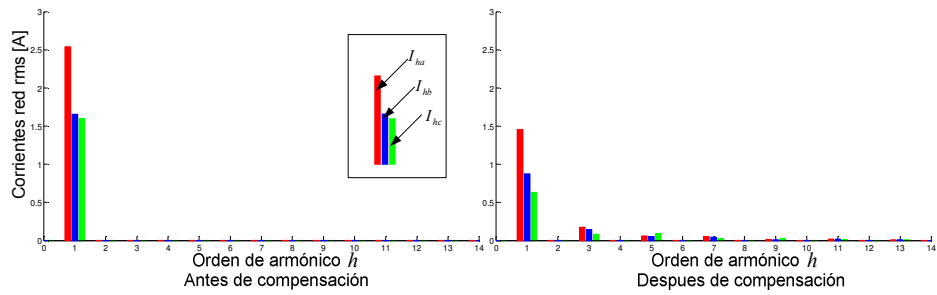


Figura 4-15. Espectros armónicos para las corrientes rms de la red antes y durante la compensación.

En la tabla de 4-7 se muestran los valores rms de las componentes armónicas de la corriente de red y sus THD_I 's durante la compensación.

$I_{a1} = 1.45 \text{ A}$	$I_{a3} = 0.17 \text{ A}$	$I_{a5} = 0.06 \text{ A}$	$I_{a7} = 0.05 \text{ A}$	$I_{a9} = 0.01 \text{ A}$	$I_{a11} = 0.02 \text{ A}$	$I_{a13} = 0 \text{ A}$	$THD_{Ia} = 13.1\%$
$I_{b1} = 0.88 \text{ A}$	$I_{b3} = 0.14 \text{ A}$	$I_{b5} = 0.04 \text{ A}$	$I_{b7} = 0.04 \text{ A}$	$I_{b9} = 0.01 \text{ A}$	$I_{b11} = 0.01 \text{ A}$	$I_{b13} = 0.01 \text{ A}$	$THD_{Ib} = 17.1\%$
$I_{c1} = 0.63 \text{ A}$	$I_{c3} = 0.08 \text{ A}$	$I_{c5} = 0.09 \text{ A}$	$I_{c7} = 0.03 \text{ A}$	$I_{c9} = 0.03 \text{ A}$	$I_{c11} = 0.01 \text{ A}$	$I_{c13} = 0.01 \text{ A}$	$THD_{Ic} = 20.4\%$
$I_{n1} = 0.75 \text{ A}$	$I_{n3} = 0.06 \text{ A}$	$I_{n5} = 0.08 \text{ A}$	$I_{n7} = 0.02 \text{ A}$	$I_{n9} = 0.03 \text{ A}$	$I_{n11} = 0.01 \text{ A}$	$I_{n13} = 0.01 \text{ A}$	$THD_{In} = 14.29\%$
$I_a = 1.46 \text{ A}$		$I_b = 0.89 \text{ A}$		$I_c = 0.64 \text{ A}$		$I_n = 0.76 \text{ A}$	
$I_1^+ = 0.95 \text{ A}$			$I_1^{+a} = 0.68 \text{ A}$			$I_1^{+r} = 0.66 \text{ A}$	
$I_1^- = 0.24 \text{ A}$			$I_1^0 = 0.24 \text{ A}$			$I_{U1\#} = 0.34 \text{ A}$	
$I_{aH} = 0.19 \text{ A}$		$I_{bH} = 0.15 \text{ A}$		$I_{cH} = 0.13 \text{ A}$		$I_{nH} = 0.11 \text{ A}$	
$I_{eH} = 1.05 \text{ A}$		$I_{e1\#} = 1.04 \text{ A}$		$I_{eH\#} = 0.16 \text{ A}$		$THD_{eH\#} = 15.18\%$	

Tabla 4-7. Corrientes de red y THD_{eI} 's durante la compensación.

Si se comparan la tabla 4-5 (antes de la compensación) y la tabla 4-7 (durante la compensación) se observa que tras la compensación sucede lo siguiente:

- Las corrientes de red fundamentales se reducen. I_{a1} se reduce de 2.54 A a 1.45 A, I_{b1} se reduce de 1.65 A a 0.88 A, e I_{c1} se reduce de 1.60 A a 0.63 A. El algoritmo es efectivo para reducir las corrientes fundamentales ineficientes que demanda la carga y que están cuantificadas por Q_1^+ y $S_{U1\#}$ en la tabla 4-6.
- La corriente fundamental que circula por el neutro (I_{n1}) también se reduce de 1.85 A a 0.75 A, por lo que, el algoritmo es efectivo para reducir componentes fundamentales de secuencia cero.
- Aparecen componentes armónicas que no existían antes de la compensación. Se produce un aumento considerable de los armónicos de corriente de orden 3, 5, 7, 9, 11 y 13. El THD_{Ia} aumenta de 0 % a 13.1 %, el THD_{Ib} aumenta de 0 % a 17.1 %, el THD_{Ic} aumenta de 0 % a 20.4 %, el THD_{In} aumenta de 0 % a 14.29 %, y el $THD_{eH\#}$ aumenta de 0 % a 15.18 %.

En la tabla 4-8 se encuentran resumidos las principales magnitudes de potencia suministradas por la red tras la compensación.

$S_{eH} = 396.22 \text{ VA}$					
$S_{e1\#} = 391.73 \text{ VA}$			$S_{eN\#} = 59.49 \text{ VA}$		
$S_1^+ = 355.65 \text{ VA}$		$S_{U1\#} = 164.21 \text{ VA}$	$D_{eH} = 59.49 \text{ VA}$	$S_{eH\#} = 0 \text{ VA}$	$D_{eV\#} = 0 \text{ VA}$
$P_1^+ = 254.4 \text{ W}$	$Q_1^+ = 248.53 \text{ var}$				

Tabla 4-8. Magnitudes de potencia suministradas por la red tras la compensación.

Si se comparan la tabla 4-6 (antes de la compensación) y la tabla 4-8 (durante la compensación) se llega que tras la compensación:

- La red suministra menor cantidad de potencia aparente efectiva ($S_{e\#}$) disminuyendo de 741.64 VA a 396.22 VA. El algoritmo logra el objetivo que es reducir las potencias ineficientes en el sistema eléctrico de potencia.
- La potencia aparente efectiva fundamental ($S_{e1\#}$) disminuye de 741.64 VA a 355.65 VA, indicando que el SAPC suministra a la carga corrientes ineficientes fundamentales.
- La potencia aparente fundamental de secuencia positiva (S_1^+) disminuye de 661.49 VA a 355.65 VA. P_1^+ , considerada eficiente, no es compensada y permanece prácticamente constante. Q_1^+ es compensada parcialmente disminuyendo de 613.51 var a 248.53 var. Q_1^+ no puede ser totalmente compensada debido al límite de potencia del SAPC.
- La potencia de desequilibrio fundamental ($S_{U1\#}$) también es parcialmente compensada disminuyendo de 372.18 VA a 164.21 VA. Al igual que Q_1^+ , no puede ser totalmente compensada debido al límite de potencia del SAPC.
- La potencia aparente efectiva no fundamental ($S_{eN\#}$) se incrementa. Antes de la compensación el sistema eléctrico no suministraba $S_{eN\#}$ y después de la compensación $S_{eN\#}$ aumento a 59.49 VA. El aumento de $S_{eN\#}$ se debe prácticamente al aumento de $D_{e\#}$, mientras que los valores de $D_{eV\#}$, y $S_{eH\#}$ permanecen prácticamente constantes e iguales a 0 VA. $D_{e\#}$ está asociado con la demanda de corrientes armónicas y como la carga no las demanda, estas son inyectadas por el SAPC a la red eléctrica.

Con el algoritmo explicado en esta sección, el SAPC puede compensar parcialmente Q_1^+ , y $S_{U1\#}$. Sin embargo, el SAPC inyecta corrientes armónicas a la red eléctrica provocando la presencia de $S_{eN\#}$ en la red de suministro. Estas corrientes armónicas pueden provocar problemas que antes no existían (ver capítulo 3). La inyección de corrientes armónicas a la red se debe a que el coeficiente K_{Gn} es calculado para cada nueva muestra adquirida, por lo que, las corrientes de compensación, tras el escalado, no son proporcionales a las corrientes ineficientes que la carga demanda en un periodo completo de la señal fundamental.

Las magnitudes de potencia se calculan en base a la información obtenida en un periodo completo de la señal fundamental. Así que, para obtener mejores resultados, las corrientes de compensación a inyectar deben ser calculadas en base a la información de un periodo completo de la señal fundamental. Con el algoritmo analizado en esta sección, las corrientes de compensación antes del escalado se calculan en base a la información obtenida en un periodo completo de la señal fundamental. Sin embargo, el coeficiente K_{Gn} es obtenido (y aplicado) para cada nueva muestra adquirida. De acuerdo a lo anterior se concluye que para evitar la inyección de corrientes armónicas a la red, K_{Gn} debe de ser calculado para un periodo completo en lugar de calcularse de forma instantánea con cada nuevo conjunto de muestras.

4.4.1.2. Segundo algoritmo para realizar el escalado de las corrientes de compensación global.

Con este segundo algoritmo se pretende corregir los problemas asociados con el primer algoritmo planteado. Se elegirán coeficientes de escalado constantes para un periodo completo de la señal fundamental y diferentes para cada fase. La elección de un coeficiente constante para un periodo completo soluciona el problema de inyección de corrientes armónicas a la red de distribución de energía. Cada fase tendrá su propio coeficiente y se obtendrá en base a la medida de su respectiva corriente de carga. El algoritmo analizado en esta sección parte de la expresión (4.5), en la cual a i_{z_SAPC} se le aplica un coeficiente de escalado K_{zG} .

$$i_{z_SAPC_G} = K_{zG} \cdot i_{z_SAPC} \quad (4.38)$$

El algoritmo utilizado para calcular K_{zG} es descrito a continuación, es aplicado independientemente para cada fase, y puede verse en el flujograma de la figura 4-16:

1. Para poder iniciar la ejecución del algoritmo, se mide y almacena en el buffer circular un periodo completo de las corrientes de la carga (i_{z_load}).
2. Se obtienen las corrientes de compensación en el último instante de tiempo muestreado y teniendo en cuenta la información del último periodo de tiempo almacenado, de acuerdo al apartado 4.1 de la tesis.
3. Se obtiene el valor máximo por periodo de i_{z_SAPC} ($I_{z_SAPC_max}$).
4. En el caso de que $I_{z_SAPC_max} \leq I_{MAXSAPC}$, no se requiere el escalado de i_{z_SAPC} , por lo que K_{zG} se le asigna el valor de 1. Si $I_{z_SAPC_max} > I_{MAXSAPC}$, se calcula K_{zG} para cada una de las fases con la siguiente expresión.

$$K_{zG} = \frac{I_{MAXSAPC}}{I_{z_SAPC_max}} \quad (4.39)$$

5. Se realiza el escalado de i_{z_SAPC} para cada una de las fases y para un periodo completo de la señal fundamental, de acuerdo a la ecuación:

$$i_{z_SAPC_G} = K_{zG} \cdot i_{z_SAPC} \quad (4.40)$$

6. Se obtiene una nueva muestra y se almacena en el buffer circular con ayuda del método de la ventana deslizante. Se retorna al paso 2 del algoritmo.

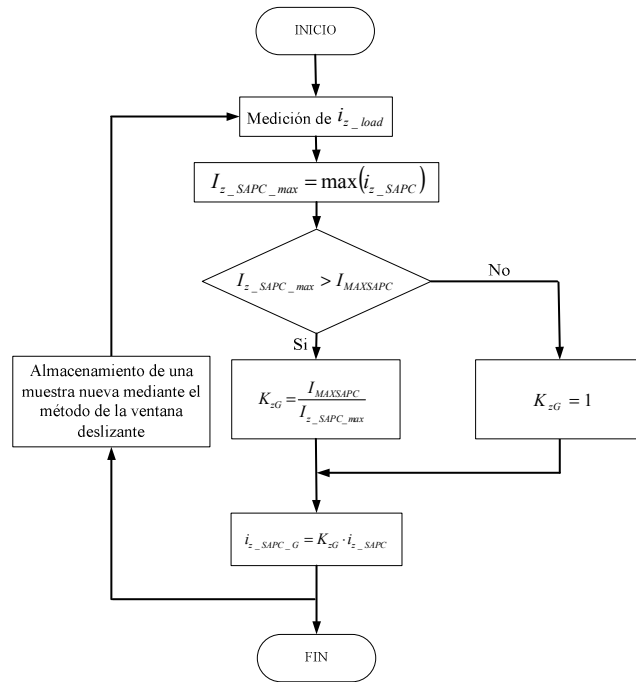


Figura 4-16. Flujoograma del segundo algoritmo para realizar el escalado de las corrientes de compensación global.

Para verificar el funcionamiento del algoritmo planteado se realizaron simulaciones en Matlab-Simulink. Se utilizará el mismo modelo de la figura 4-10 adicionando a la carga en cada fase un rectificador monofásico con carga R/C (ver figura 4-17).

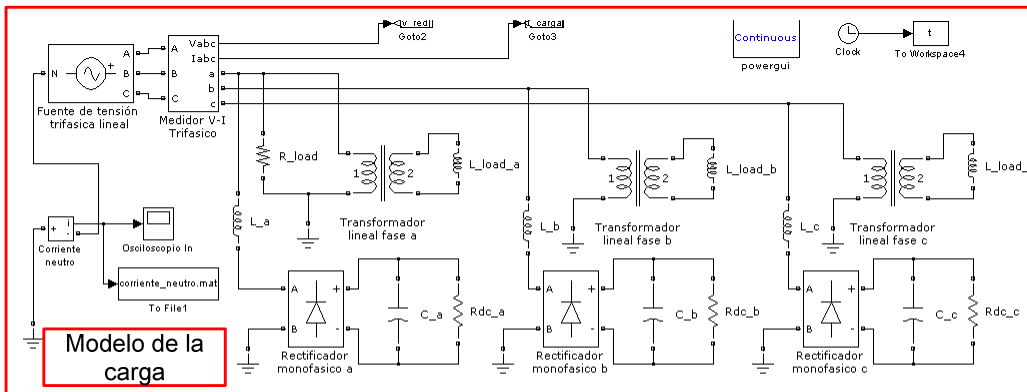


Figura 4-17. Carga para la simulación bajo estudio.

En el algoritmo analizado en el apartado anterior no se incluyó la carga no lineal con el objetivo de resaltar el problema asociado a la inyección de corrientes no fundamentales por parte del SAPC a la red eléctrica. En este caso, la carga no lineal es incluida para completar la

carga y analizar todos los fenómenos ineficientes presentes en los sistemas eléctricos reales y estudiados en la tesis. La carga ahora incluye todos los fenómenos ineficientes provocados por la conexión de cargas ineficientes (desequilibrio, desfase, y distorsión). El desequilibrio es ocasionado principalmente por la conexión de una resistencia en la fase *a* (R_{load}). El desfase es ocasionado principalmente por la conexión de transformadores lineales con carga inductiva (L_{load_a} , L_{load_b} , L_{load_c}). La distorsión es ocasionada principalmente por la conexión de los rectificadores monofásicos con carga R//C en su salida. En las tablas 4-3 y 4-4 se encuentran resumidos los valores de los parámetros de la carga correspondiente al desequilibrio y al desfase. En la tabla 4-9 se resumen los valores de los parámetros de la carga no lineal que provoca la existencia de términos de potencia relacionados con la distorsión de las señales de corriente.

(Distorsión) Rectificador + carga R//C.		
$L_a=5.048\text{ mH}$	$L_b=5.075\text{ mH}$	$L_c=5.123\text{ mH}$
$C_a=C_b=C_c=2200\text{ }\mu\text{F}$		$R_{dc_a}=R_{dc_b}=R_{dc_c}=100\text{ }\Omega$

Tabla 4-9. Carga no lineal (fenómeno de distorsión).

Las formas de onda de corriente de la carga simuladas de las fases y el neutro pueden verse en la figura 4-18.

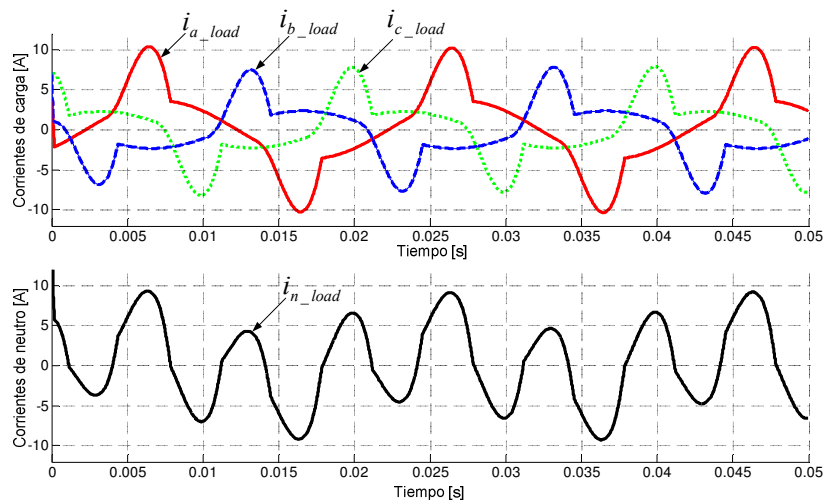


Figura 4-18. Corrientes demandadas por la carga, corrientes de las fases y corriente de neutro.

Los valores rms de las componentes armónicas de la corriente de la carga y sus THD_I 's pueden verse en la tabla 4-10.

$I_{a1} = 4.66$ A	$I_{a3} = 1.64$ A	$I_{a5} = 0.87$ A	$I_{a7} = 0.28$ A	$I_{a9} = 0.17$ A	$I_{a11} = 0.13$ A	$I_{a13} = 0.07$ A	$I_{a15} = 0.07$ A	$THD_{Ia} = 40.7\%$
$I_{b1} = 3.15$ A	$I_{b3} = 1.61$ A	$I_{b5} = 0.86$ A	$I_{b7} = 0.28$ A	$I_{b9} = 0.17$ A	$I_{b11} = 0.13$ A	$I_{b13} = 0.07$ A	$I_{b15} = 0.07$ A	$THD_{Ib} = 59.3\%$
$I_{c1} = 3.16$ A	$I_{c3} = 1.64$ A	$I_{c5} = 0.86$ A	$I_{c7} = 0.28$ A	$I_{c9} = 0.17$ A	$I_{c11} = 0.13$ A	$I_{c13} = 0.07$ A	$I_{c15} = 0.07$ A	$THD_{Ic} = 59.8\%$
$I_{n1} = 1.89$ A	$I_{n3} = 4.9$ A	$I_{n5} = 0.01$ A	$I_{n7} = 0$ A	$I_{n9} = 0.52$ A	$I_{n11} = 0$ A	$I_{n13} = 0$ A	$I_{n15} = 0.2$ A	$THD_{In} = 261\%$
$I_a = 5.01$ A		$I_b = 3.72$ A		$I_c = 3.67$ A		$I_n = 5.28$ A		
$I_1^+ = 3.62$ A			$I_1^{+a} = 2.7$ A			$I_1^{+r} = 2.41$ A		
$I_1^- = 0.65$ A			$I_1^0 = 0.61$ A			$I_{U1\#} = 0.89$ A		
$I_{aH} = 1.89$ A		$I_{bH} = 1.86$ A		$I_{cH} = 1.89$ A		$I_{nH} = 4.93$ A		
$I_{e\#} = 4.11$ A		$I_{e1\#} = 3.68$ A		$I_{eH\#} = 1.81$ A		$THD_{eH\#} = 49.18\%$		

Tabla 4-10. Corriente de carga y sus THD_I 's

En la tabla 4-11 se encuentran resumidos las principales magnitudes de potencia demandadas por la carga o suministradas por la red antes de la compensación.

$S_{e\#} = 1541.70$ VA					
$S_{e1\#} = 1383.43$ VA		$S_{eN\#} = 680.41$ VA			
$S_1^+ = 1342.82$ VA		$S_{U1\#} = 332.73$ VA	$D_{e1\#} = 680.41$ VA	$S_{eH\#} = 0$ VA	$D_{eV\#} = 0$ VA
$P_1^+ = 1001.51$ W	$Q_1^+ = 894.51$ var				

Tabla 4-11. Magnitudes de potencia demandadas por la carga.

El SAPC global es programado para que ejecute el algoritmo planteado en esta sección. Para el análisis se ha impuesto un límite de 3 A rms a las corrientes de compensación del SAPC. En el paso 2 del algoritmo, se obtienen las corrientes de compensación necesarias para suministrarle a la carga las corrientes ineficientes que demanda. Estas corrientes de compensación incluyen los fenómenos de desfase, desequilibrio, distorsión y pueden verse para un periodo completo de la señal fundamental en la figura 4-19 (i_{a_SAPC} , i_{b_SAPC} , e i_{c_SAPC}).

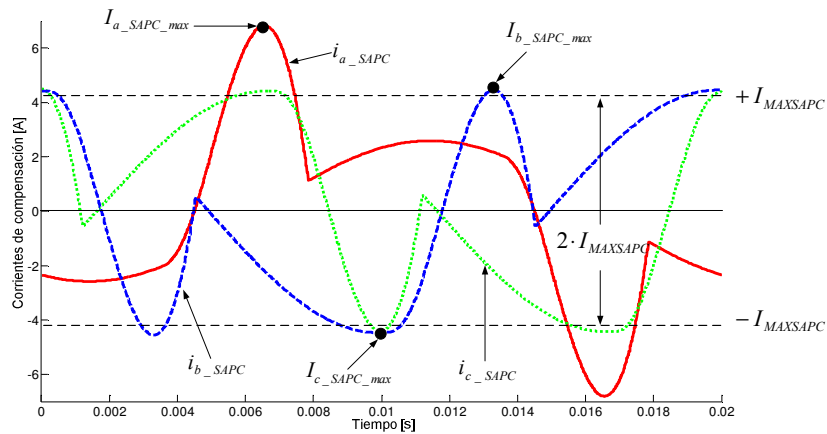


Figura 4-19. Corrientes de compensación sin escalar.

Las líneas horizontales punteadas corresponden al límite de corriente máxima del SAPC ($I_{MAXSAPC} = \pm 3 \times \sqrt{2} = \pm 4.24 A_{pico}$). Las corrientes i_{a_SAPC} , i_{b_SAPC} , e i_{c_SAPC} superan los límites de corriente ($I_{MAXSAPC}$) por lo que deben ser escaladas.

Con el algoritmo planteado se deben encontrar los valores máximos de cada corriente ($I_{a_SAPC_max}$, $I_{b_SAPC_max}$, e $I_{c_SAPC_max}$). Con base a I_{a_SAPC} , I_{b_SAPC} , e I_{c_SAPC} y la ecuación (4.39) se encuentran las escalas K_{aG} , K_{bG} , y K_{cG} para un periodo completo de la señal fundamental. Las escalas son calculadas en los instantes de tiempo donde se produce el valor máximo de corriente, sin embargo, son aplicadas para un periodo completo de la señal fundamental. Esto garantiza que, tras el escalado, las corrientes de compensación no superan a $I_{MAXSAPC}$ en ningún instante de tiempo. Para los valores de la simulación K_{aG} toma el valor de 0.62, K_{bG} toma el valor de 0.95, y K_{cG} toma el valor de 0.96. En la figura 4-20 se pueden ver las corrientes de compensación escaladas con estos coeficientes.

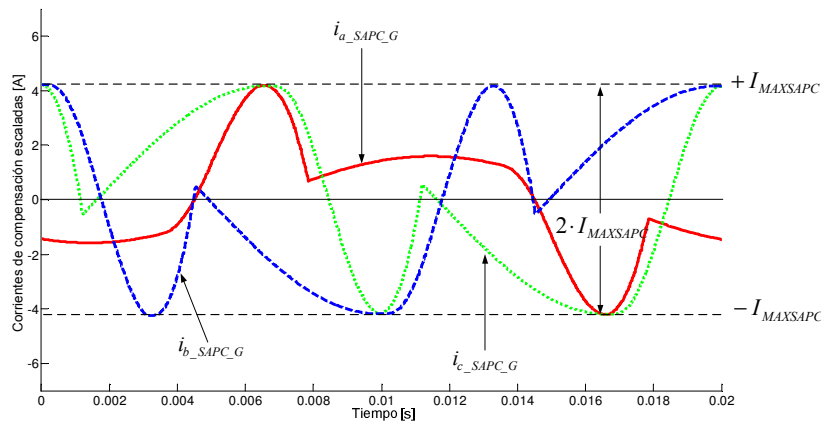


Figura 4-20. Corrientes de compensación escaladas.

Tras el escalado las nuevas corrientes de compensación ($i_{a_SAPC_G}$, $i_{b_SAPC_G}$, e $i_{c_SAPC_G}$) no superan $I_{MAXSAPC}$. Las corrientes $i_{a_SAPC_G}$, $i_{b_SAPC_G}$, e $i_{c_SAPC_G}$ son proporcionales a i_{a_SAPC} , i_{b_SAPC} , e i_{c_SAPC} respectivamente. Esto garantiza que el SAPC no inyecta componentes de corriente diferentes a las componentes de corriente demandadas por la carga. En la figura 4-21 pueden verse las corrientes de la red (fases y neutro) antes y durante la compensación.

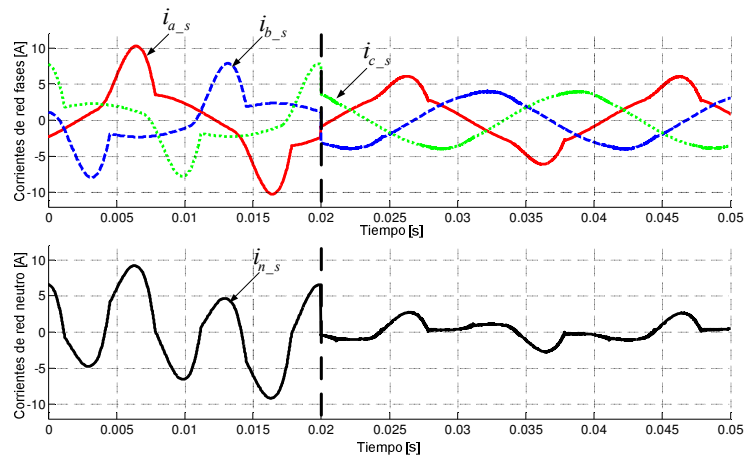


Figura 4-21. Corrientes de red antes y durante la compensación.

La figura 4-21 está dividida en dos por una línea vertical punteada en el instante de tiempo de 0.02 s, instante en el que empieza la compensación. En la parte izquierda se pueden ver las corrientes de red antes de la compensación y en la parte derecha se pueden ver las corrientes de red después de la compensación. Tras la compensación el valor máximo de las corrientes de red (fases y neutro) se reduce considerablemente, sin embargo las formas de onda son diferentes. En la figura 4-22 se muestra el espectro armónico de las corrientes rms para las fases de la red antes y durante la compensación. En la figura 4-23 se muestra el espectro armónico de la corriente rms para el neutro de la red antes y durante la compensación. En la tabla de 4-14 se muestran los valores rms de las componentes armónicas de las corriente de red (fases y neutro) y sus THD_1 's durante la compensación.

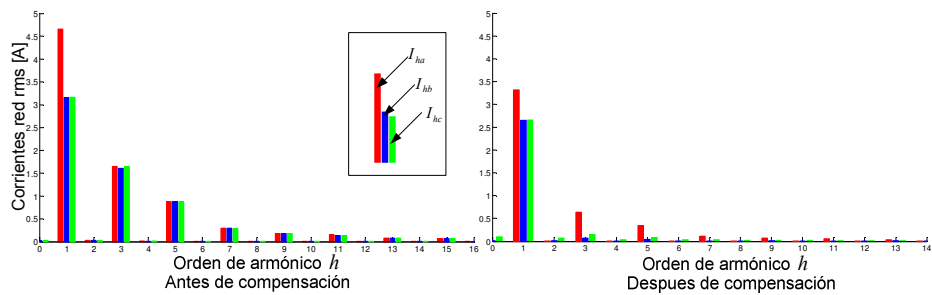


Figura 4-22. Espectros armónicos para las corrientes rms de la red (fases a , b , y c) antes y durante la compensación.

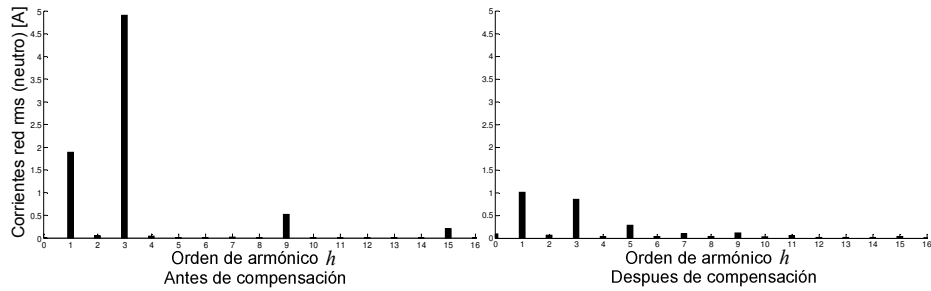


Figura 4-23. Espectros armónicos para la corriente rms de neutro de la red antes y durante la compensación.

$I_{a1} = 3.32 \text{ A}$	$I_{a3} = 0.64 \text{ A}$	$I_{a5} = 0.34 \text{ A}$	$I_{a7} = 0.11 \text{ A}$	$I_{a9} = 0.06 \text{ A}$	$I_{a11} = 0.05 \text{ A}$	$I_{a13} = 0.03 \text{ A}$	$THD_{Ia} = 22.2\%$
$I_{b1} = 2.65 \text{ A}$	$I_{b3} = 0.07 \text{ A}$	$I_{b5} = 0.04 \text{ A}$	$I_{b7} = 0 \text{ A}$	$I_{b9} = 0.02 \text{ A}$	$I_{b11} = 0 \text{ A}$	$I_{b13} = 0.01 \text{ A}$	$THD_{Ib} = 3.16\%$
$I_{c1} = 2.66 \text{ A}$	$I_{c3} = 0.14 \text{ A}$	$I_{c5} = 0.08 \text{ A}$	$I_{c7} = 0.03 \text{ A}$	$I_{c9} = 0.02 \text{ A}$	$I_{c11} = 0.01 \text{ A}$	$I_{c13} = 0.01 \text{ A}$	$THD_{Ic} = 6.23\%$
$I_{n1} = 1 \text{ A}$	$I_{n3} = 0.85 \text{ A}$	$I_{n5} = 0.27 \text{ A}$	$I_{n7} = 0.09 \text{ A}$	$I_{n9} = 0.11 \text{ A}$	$I_{n11} = 0.05 \text{ A}$	$I_{n13} = 0.02 \text{ A}$	$THD_{In} = 90.5\%$
$I_a = 3.4 \text{ A}$		$I_b = 2.65 \text{ A}$		$I_c = 2.66 \text{ A}$		$I_n = 1.35 \text{ A}$	
$I_1^+ = 2.88 \text{ A}$			$I_1^{+a} = 2.85 \text{ A}$			$I_1^{+r} = 0.39 \text{ A}$	
$I_1^- = 0.23 \text{ A}$			$I_1^0 = 0.23 \text{ A}$			$I_{U1\#} = 0.33 \text{ A}$	
$I_{aH} = 0.74 \text{ A}$		$I_{bH} = 0.08 \text{ A}$		$I_{cH} = 0.17 \text{ A}$		$I_{nH} = 1.35 \text{ A}$	
$I_{e\#} = 2.93 \text{ A}$		$I_{e1\#} = 2.89 \text{ A}$		$I_{eH\#} = 0.44 \text{ A}$		$THD_{e\#} = 15.16\%$	

Tabla 4-12. Corriente de red y sus THD_I 's durante la compensación.

Si se comparan la tabla 4-10 (antes de la compensación) y la tabla 4-12 (durante la compensación) se concluye que tras la compensación sucede lo siguiente:

- Las corrientes de red fundamentales se reducen. I_{a1} se reduce de 4.66 A a 3.32 A, I_{b1} se reduce de 3.15 A a 2.65 A, e I_{c1} se reduce de 3.16 A a 2.66 A. El algoritmo es efectivo para reducir las corrientes fundamentales ineficientes que demanda la carga.
- La corriente fundamental que circula por el neutro (I_{n1}) también se reduce de 1.89 A a 1 A, por lo que, el algoritmo es efectivo para reducir componentes fundamentales de secuencia cero.
- La distorsión armónica de corriente disminuye. El THD_{Ia} se reduce de 40.7 % a 22.2 %, el THD_{Ib} se reduce de 59.3 % a 3.16 %, el THD_{Ic} se reduce de 59.8 % a 6.23 %, el THD_{In} se reduce de 261 % a 90.5 %, y el THD_{eI} se reduce de 49.18 % a 15.16 %. El algoritmo es efectivo para reducir las corrientes no fundamentales que demanda la carga.
- Las corrientes armónicas que suministra la red antes de la compensación son equilibradas. Tras la compensación, las corrientes armónicas que suministra la red son desequilibradas. Con el algoritmo planteado son prácticamente compensadas las

corrientes armónicas de las fases *b* y *c*. Mientras que las corrientes armónicas de la fase *a* no alcanzan a ser compensadas.

- Las corrientes que circulan por el neutro antes de la compensación son las corrientes de orden 1, 3, 9, y 15. La circulación de la corriente fundamental se debe al desequilibrio de la carga. La circulación de los armónicos de corriente de orden 3, 9, y 15 es propia de los rectificadores trifásicos de onda completa. Tras la compensación, se reduce el valor máximo de estas componentes de corriente armónica, sin embargo, por el neutro empiezan a circular otras componentes de corriente armónica de orden 5, y 7 que extraordinariamente circulan por el neutro. Estas empiezan a circular debido a que el SAPC realiza una compensación desequilibrada de las corrientes de la carga, la circulación de estas corrientes por el neutro puede provocar problemas que antes no existían.

En la tabla 4-13 se encuentran resumidos las principales magnitudes de potencia suministradas por la red tras la compensación.

$S_{e\#} = 1097.54 \text{ VA}$				
$S_{e1\#} = 1085.13 \text{ VA}$		$S_{eN\#} = 164.58 \text{ VA}$		
$S_1^+ = 1081.31 \text{ VA}$		$S_{U1\#} = 90.97 \text{ VA}$	$D_{e1\#} = 164.58 \text{ VA}$	$S_{eH} = 0 \text{ VA}$
$P_1^+ = 1071.13 \text{ W}$	$Q_1^+ = 148.01 \text{ var}$			

Tabla 4-13. Magnitudes de potencia suministradas por la red tras la compensación.

Si se comparan la tabla 4-11 (antes de la compensación) y la tabla 4-13 (durante la compensación) se observa que tras la compensación sucede lo siguiente:

- La red suministra menor cantidad de potencia aparente efectiva ($S_{e\#}$) disminuyendo de 1541.70 VA a 1097.54 VA. El algoritmo logra el objetivo que es reducir las potencias ineficientes en el sistema eléctrico de potencia.
- La potencia aparente efectiva fundamental ($S_{e1\#}$) disminuye de 1383.43 VA a 1085.13 VA. Esto indica que el SAPC suministra a la carga corrientes ineficientes fundamentales.
- La potencia aparente fundamental de secuencia positiva (S_1^+) disminuye de 1342.82 VA a 1081.31 VA. P_1^+ , considerada eficiente, no es compensada y permanece prácticamente constante. Q_1^+ es compensada parcialmente disminuyendo de 894.51 var a 148.01 var. Q_1^+ no puede ser totalmente compensada debido al límite de potencia del SAPC.
- La potencia de desequilibrio fundamental ($S_{U1\#}$) también es parcialmente compensada y disminuye de 337.73 VA a 90.97 VA. Al igual que Q_1^+ , no puede ser totalmente compensada debido al límite de potencia del SAPC.

- La potencia aparente efectiva no fundamental ($S_{eN\#}$) también es parcialmente compensada, $S_{eN\#}$ disminuye de 680.41 VA a 164.58 VA. Al igual que Q_1^+ y $S_{U1\#}$ no puede ser totalmente compensada debido al límite de potencia del SAPC.

El algoritmo planteado en esta sección posee buenas prestaciones, ya que todas las magnitudes de potencia son ampliamente reducidas. Sin embargo, el SAPC realiza una compensación desequilibrada de potencia. Las corrientes armónicas, antes equilibradas, se encuentran desequilibradas, no pudiéndose cuantificar ya que en la IEEE Std. 1459-2010 no existe ningún término de potencia que cuantifique el desequilibrio provocado por componentes de corriente no fundamental. Que el SAPC provoque el desequilibrio de las corrientes no fundamentales es un efecto no deseado y debe ser corregido. Para esto se plantea un tercer algoritmo con una única escala para las tres fases y para un periodo completo de la señal fundamental.

4.4.1.3. Tercer algoritmo para realizar el escalado de las corrientes de compensación global. Estrategia de compensación G_L .

Con este tercer algoritmo se pretende corregir los problemas asociados con el primer y segundo algoritmos planteados. Se elegirá una escala constante para un periodo completo de la señal fundamental y única para las tres fases. La elección de una escala constante para un periodo completo de la señal fundamental soluciona el problema de inyección de corrientes armónicas a la red de distribución de energía. La elección de una escala única para las tres fases evita que el SAPC realice una compensación desequilibrada de corriente en cada una de sus fases de salida. El algoritmo analizado en esta sección parte de la expresión (4.5), en la cual a i_{z_SAPC} se le aplica un factor de escala K_G .

$$i_{z_SAPC_G} = K_G \cdot i_{z_SAPC} \quad (4.41)$$

El algoritmo utilizado para calcular K_G es descrito a continuación y puede verse en el flujograma de la figura 4-24:

1. Para poder iniciar la ejecución del algoritmo, se mide y almacena en el buffer circular un periodo completo de las corrientes de la carga (i_{z_load}).
2. Se obtienen las corrientes de compensación en el último instante de tiempo muestreado y teniendo en cuenta la información del último periodo de tiempo almacenado, de acuerdo al apartado 4.1 de la tesis.
3. Se obtiene el valor máximo por periodo de i_{z_SAPC} ($I_{z_SAPC_max}$).
4. En el caso de que $I_{z_SAPC_max} \leq I_{MAXSAPC}$, no se requiere el escalado de i_{z_SAPC} por lo que K_{zG} se le asigna el valor de 1, de lo contrario ($I_{z_SAPC_max} > I_{MAXSAPC}$) se calcula K_{zG} , para cada fase, con la siguiente expresión.

$$K_{zG} = \frac{I_{MAXSAPC}}{I_{z_SAPC_max}} \quad (4.42)$$

5. Se asigna a K_G el valor de la menor escala de entre las calculadas para las tres fases: $K_G = \min(K_{aG}, K_{bG}, K_{cG})$.
6. Los coeficientes de escalado de cada fase se hacen iguales al coeficiente mínimo ($K_{aG} = K_{bG} = K_{cG} = K_G$).
7. Se realiza el escalado de la corriente que ha de generar el SAPC en su salida (i_{z_SAPC}) en las tres fases de acuerdo a la ecuación:

$$i_{z_SAPC_G} = K_{zG} \cdot i_{z_SAPC} \quad (4.43)$$

8. Se obtiene una nueva muestra y se almacena en el buffer circular con ayuda del método de la ventana deslizante. Se retorna al paso 2 del algoritmo.

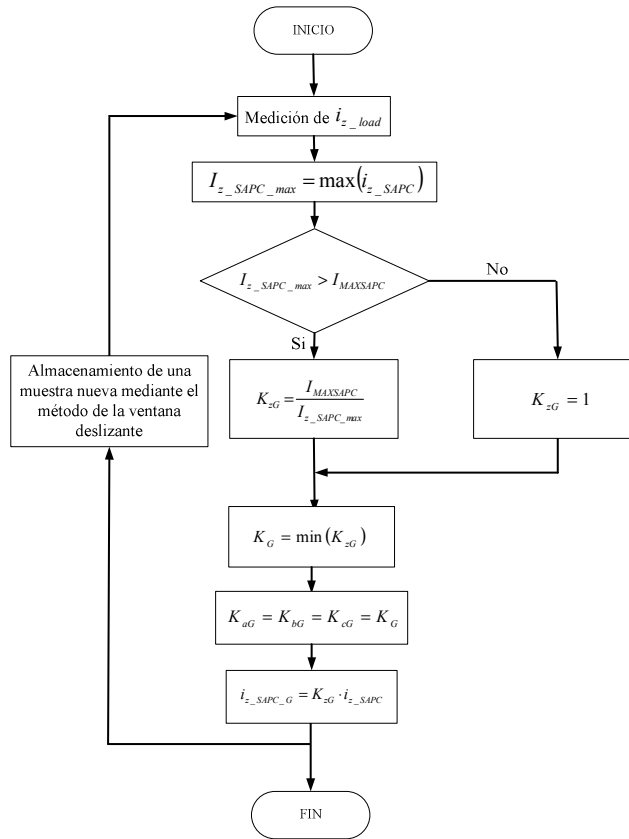


Figura 4-24. Flujograma del tercer algoritmo para realizar el escalado de las corrientes de compensación global.

Para verificar el funcionamiento del algoritmo planteado se realizaron simulaciones en Matlab-Simulink. Se utiliza el mismo modelo de carga mostrado en la figura 4-17. Las corrientes de

carga o de red antes de la compensación son las de la figura 4-18 y la tabla 4-10. Las magnitudes de potencia de la IEEE Std. 1459-2010 están resumidas en la tabla 4-11. El SAPC es programado para que ejecute el algoritmo planteado en esta sección. Para el análisis, al igual que el algoritmo anterior, se ha impuesto un límite de 3 A rms a las corrientes de compensación del SAPC. En el paso 2 del algoritmo, se obtienen las corrientes de compensación necesarias para suministrarle a la carga las corrientes ineficientes que demanda, estas corrientes son las de la figura 4-19. El coeficiente constante para un periodo completo y único para las tres fases (K_G) toma el valor de 0.62. K_G es el menor coeficiente entre $K_{aG}=0.62$, $K_{bG}=0.95$, y $K_{cG}=0.96$. En la figura 4-25 se pueden ver las corrientes de compensación escaladas.

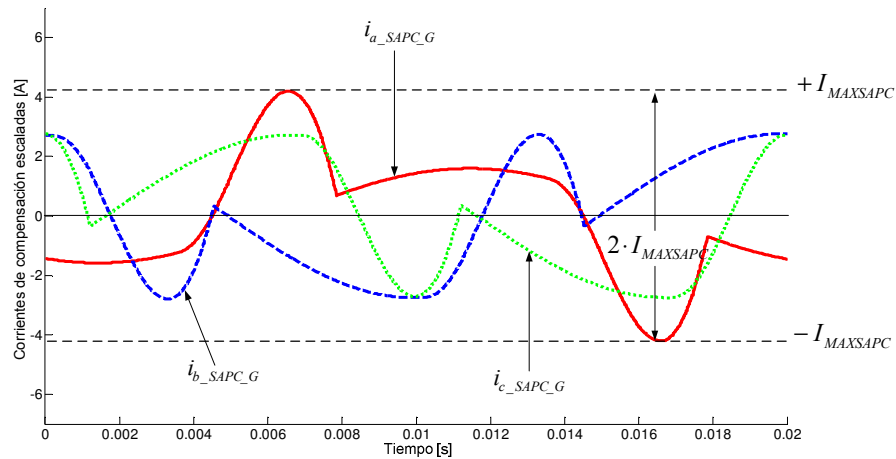


Figura 4-25. Corrientes de compensación escaladas.

Tras el escalado las nuevas corrientes de compensación ($i_{a_SAPC_G}$, $i_{b_SAPC_G}$, e $i_{c_SAPC_G}$) no superan $I_{MAXSAPC}$. Las corrientes $i_{a_SAPC_G}$, $i_{b_SAPC_G}$, e $i_{c_SAPC_G}$ son proporcionales a i_{a_SAPC} , i_{b_SAPC} , e i_{c_SAPC} respectivamente. Esto garantiza que el SAPC no inyecta componentes de corriente diferentes a las componentes de corriente de la carga.

El valor máximo de la corriente $i_{a_SAPC_G}$ coincide con $I_{MAXSAPC}$. Los valores máximos de $i_{b_SAPC_G}$, e $i_{c_SAPC_G}$ son menores que $I_{MAXSAPC}$, esto se debe a que existe un coeficiente único K_G , y que todas las corrientes son escaladas en la misma proporción, garantizando una compensación equilibrada de las corrientes ineficientes. En la figura 4-26 puede verse las corrientes de red antes y durante la compensación.

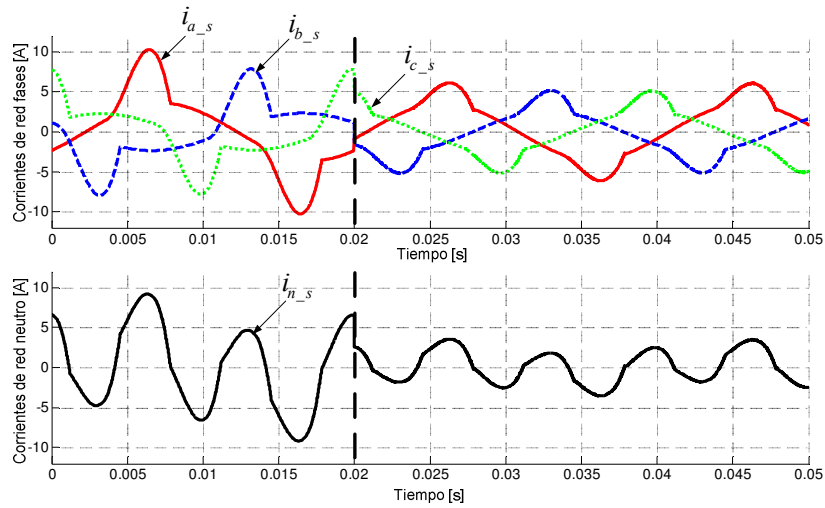


Figura 4-26. Corrientes de red antes y durante la compensación.

La figura 4-26 está dividida en dos por una línea vertical punteada en el instante de tiempo de 0.02 s. En la parte izquierda se pueden ver las corrientes de red antes de la compensación, y en la parte derecha se pueden ver las corrientes de red después de la compensación. Tras la compensación el valor máximo de las corrientes de red (fases y neutro) se reduce considerablemente. En la figura 4-27 se muestra el espectro armónico de las corrientes rms para las fases de la red antes y durante la compensación, mientras que en la figura 4-28 se muestra el espectro armónico de la corriente rms para el neutro de la red antes y durante la compensación. En la tabla de 4-16 se muestran los valores rms de las componentes armónicas de las corriente de red (fases y neutro) y sus THD_I 's durante la compensación.

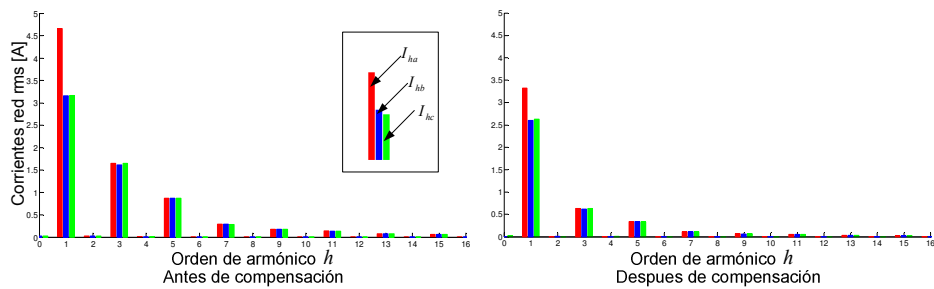


Figura 4-27. Espectros armónicos para las corrientes rms de la red (fases a , b , y c) antes y durante la compensación.

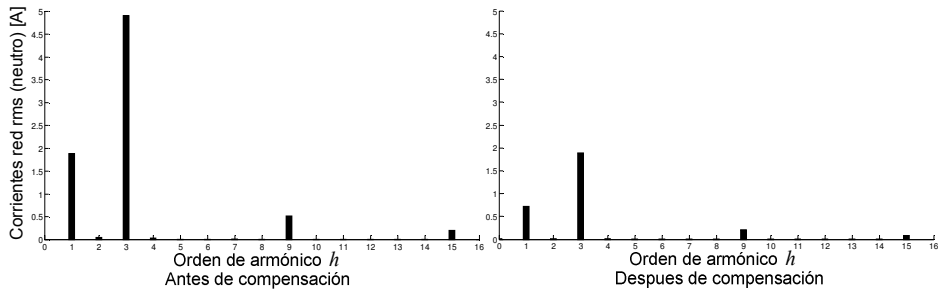


Figura 4-28. Espectros armónicos para la corriente rms de neutro de la red antes y durante la compensación.

$I_{a1} = 3.19 \text{ A}$	$I_{a3} = 0.64 \text{ A}$	$I_{a5} = 0.34 \text{ A}$	$I_{a7} = 0.11 \text{ A}$	$I_{a9} = 0.06 \text{ A}$	$I_{a11} = 0.05 \text{ A}$	$I_{a13} = 0.03 \text{ A}$	$I_{a15} = 0.04 \text{ A}$	$THD_{Ia} = 18.2\%$
$I_{b1} = 2.58 \text{ A}$	$I_{b3} = 0.62 \text{ A}$	$I_{b5} = 0.34 \text{ A}$	$I_{b7} = 0.11 \text{ A}$	$I_{b9} = 0.06 \text{ A}$	$I_{b11} = 0.05 \text{ A}$	$I_{b13} = 0.03 \text{ A}$	$I_{b15} = 0.04 \text{ A}$	$THD_{Ib} = 24.4\%$
$I_{c1} = 2.6 \text{ A}$	$I_{c3} = 0.63 \text{ A}$	$I_{c5} = 0.33 \text{ A}$	$I_{c7} = 0.11 \text{ A}$	$I_{c9} = 0.06 \text{ A}$	$I_{c11} = 0.05 \text{ A}$	$I_{c13} = 0.03 \text{ A}$	$I_{c15} = 0.04 \text{ A}$	$THD_{Ic} = 24.2\%$
$I_{n1} = 1.74 \text{ A}$	$I_{n3} = 1.90 \text{ A}$	$I_{n5} = 0 \text{ A}$	$I_{n7} = 0 \text{ A}$	$I_{n9} = 0.2 \text{ A}$	$I_{n11} = 0 \text{ A}$	$I_{n13} = 0 \text{ A}$	$I_{n15} = 0.08 \text{ A}$	$THD_{In} = 266\%$
$I_a = 3.27 \text{ A}$		$I_b = 2.68 \text{ A}$		$I_c = 2.70 \text{ A}$		$I_n = 2.59 \text{ A}$		
$I_1^+ = 2.79 \text{ A}$			$I_1^{+a} = 2.67 \text{ A}$			$I_1^{+r} = 0.82 \text{ A}$		
$I_1^- = 0.2 \text{ A}$			$I_1^0 = 0.2 \text{ A}$			$I_{U1\#} = 0.28 \text{ A}$		
$I_{aH} = 0.74 \text{ A}$		$I_{bH} = 0.72 \text{ A}$		$I_{cH} = 0.73 \text{ A}$		$I_{nH} = 2.53 \text{ A}$		
$I_{e\#} = 2.87 \text{ A}$		$I_{eI\#} = 2.80 \text{ A}$		$I_{eH\#} = 0.62 \text{ A}$		$THD_{eI\#} = 22.20\%$		

Tabla 4-14. Corrientes de red y sus THD_I 's durante la compensación.

Si se comparan la tabla 4-10 (antes de la compensación) y la tabla 4-14 (durante la compensación) se concluye que tras la compensación sucede lo siguiente:

- Las corrientes de red fundamentales se reducen. I_{a1} se reduce de 4.66 A a 3.19 A, I_{b1} se reduce de 3.15 A a 2.58 A, e I_{c1} se reduce de 3.16 A a 2.6 A. El algoritmo es efectivo para reducir las corrientes fundamentales ineficientes que demanda la carga.
- La corriente fundamental que circula por el neutro (I_{n1}) también se reduce de 1.89 A a 1.74 A. Por lo que, el algoritmo es efectivo para reducir componentes fundamentales de secuencia cero.
- El THD_{Ia} se reduce de 40.7 % a 18.2 %, el THD_{Ib} se reduce ligeramente de 59.3 % a 24.4 %, el THD_{Ic} se reduce de 59.8 % a 24.2 %, el THD_{In} se aumenta ligeramente de 261 % a 266 %, y el $THD_{eI\#}$ se reduce de 49.18 % a 22.20 %. Que el THD_{In} aumenta indica que se compensa en mayor proporción las corrientes fundamentales que las corrientes no fundamentales que circulan por el neutro. En términos generales, el algoritmo es efectivo para reducir las corrientes no fundamentales que demanda la carga.
- Las corrientes armónicas antes y durante la compensación se encuentran equilibradas. Las componentes de corriente armónica que circulan por el neutro disminuyen, además

no aparecen por el neutro otras componentes de corriente diferentes a las que ya existían.

En la tabla 4-15 se encuentran resumidas las principales magnitudes de potencia suministradas por la red tras la compensación.

$S_{e\#} = 1077.49 \text{ VA}$					
$S_{e1\#} = 1051.87 \text{ VA}$			$S_{eN\#} = 233.55 \text{ VA}$		
$S_1^+ = 1046.50 \text{ VA}$		$S_{U1\#} = 106.14 \text{ VA}$	$D_{e1\#} = 233.55 \text{ VA}$	$S_{eH\#} = 0 \text{ VA}$	$D_{eV\#} = 0 \text{ VA}$
$P_1^+ = 1000.5 \text{ W}$	$Q_1^+ = 306.84 \text{ var}$				

Tabla 4-15. Magnitudes de potencia suministradas por la red tras la compensación.

Si se comparan la tabla 4-11 (antes de la compensación) y la tabla 4-15 (durante la compensación) se llega que tras la compensación sucede lo siguiente:

- La red suministra menor cantidad de potencia aparente efectiva ($S_{e\#}$) disminuyendo de 1541.70 VA a 1077.49 VA. El algoritmo logra el objetivo que es reducir las potencias ineficientes en el sistema eléctrico de potencia.
- La potencia aparente efectiva fundamental ($S_{e1\#}$) disminuye de 1383.43 VA a 1051.87 VA. Esto indica que el SAPC suministra a la carga corrientes ineficientes fundamentales.
- La potencia aparente fundamental de secuencia positiva (S_1^+) disminuye de 1342.82 VA a 1046.50 VA. P_1^+ , considerada eficiente, no es compensada y permanece prácticamente constante. Q_1^+ es compensada parcialmente disminuyendo de 894.51 var a 306.84 var. Q_1^+ no puede ser totalmente compensada debido al límite de potencia del SAPC.
- La potencia de desequilibrio fundamental ($S_{U1\#}$) también es parcialmente compensada, disminuyendo de 337.73 VA a 106.14 VA. Al igual que Q_1^+ , no puede ser totalmente compensada debido al límite de potencia del SAPC.
- La potencia aparente efectiva no fundamental ($S_{eN\#}$) también es parcialmente compensada, $S_{eN\#}$ disminuye de 680.41 VA a 233.55 VA. Al igual que Q_1^+ y $S_{U1\#}$, no puede ser totalmente compensada debido al límite de potencia del SAPC.

El algoritmo planteado en esta sección posee buenas prestaciones, ya que todas las magnitudes de potencia son reducidas. Con el algoritmo planteado, el SAPC no inyecta componentes de corriente armónica a la red de suministro, y realiza una compensación equilibrada de las corrientes ineficientes de la carga. Por estos motivos este algoritmo será tomado como base para la compensación selectiva de las corrientes ineficientes de la carga con limitación de potencia. Este algoritmo será usado en los siguientes capítulos, y para distinguirlo del resto

será nombrado como “algoritmo de compensación global con limitación de potencia o algoritmo de compensación G_L ”.

4.4.2. Algoritmo para realizar el escalado de las corrientes de compensación usando la estrategia de compensación selectiva.

Las corrientes de compensación para la estrategia de compensación selectiva con limitación de potencia fueron deducidas en la sección 4.3.2. Para elegir los coeficientes de escalado se tendrá en cuenta el algoritmo de la sección 4.4.1.3, por lo que, cada coeficiente para realizar el escalado es constante para un periodo completo y único para las tres fases. Con coeficientes de estas características, el SAPC puede realizar la compensación selectiva de las corrientes ineficientes de la carga evitando la inyección de corrientes armónicas diferentes a las corrientes armónicas demandadas por la carga y evitando la inyección de corrientes que provoquen desequilibrios que antes no existían. De acuerdo a estas consideraciones y partiendo de la ecuación (4.6), las corrientes de compensación son escaladas con los coeficientes K_H , K_U , y K_Q y están dadas por:

$$i_{z_SAPC_S} = K_H \cdot i_{zH_SAPC} + K_U \cdot i_{zU1_SAPC} + K_Q \cdot i_{z1_SAPC}^{+r} = i_{zH_SAPC_S} + i_{zU1_SAPC_S} + i_{z1_SAPC_S}^{+r} \quad (4.44)$$

Las corrientes de compensación de la ecuación (4.44) están conformadas por tres corrientes de compensación ineficientes (i_{zH_SAPC} , i_{zU1_SAPC} , e $i_{z1_SAPC}^{+r}$). En el caso de superar los límites de corriente del SAPC ($I_{MAXSAPC}$), cada una de estas corrientes son escaladas. Los coeficientes de escalado para la estrategia de compensación selectiva permiten la elección de las corrientes ineficientes a compensar. En algunas ocasiones conviene compensar sólo una de las corrientes, mientras que en otras ocasiones conviene compensar la combinación de varias de ellas. El algoritmo propuesto en esta sección será capaz de elegir la combinación de potencias ineficientes a compensar aumentando el aprovechamiento del SAPC. La secuencia o prioridad en la compensación de las potencias ineficientes de la carga también influye en el aprovechamiento de la capacidad de potencia del SAPC (S_{SAPC}). En algunas situaciones, por ejemplo, no se aprovecha de la misma manera la potencia S_{SAPC} , si se compensa primero Q_1^+ y luego $S_{eN\#}$, que si se compensa primero $S_{eN\#}$ y luego Q_1^+ . Existen 6 secuencias posibles para realizar la compensación, las cuales son denominadas (S1, S2, S3, S4, S5, y S6). Estas secuencias se encuentran resumidas en la siguiente tabla.

Potencia ineficiente y su corriente de compensación asociada	Secuencias de compensación de potencia.					
	S1	S2	S3	S4	S5	S6
$S_{eN\#}$ (i_{zH_SAPC})	1	1	2	2	3	3
$S_{U1\#}$ (i_{zU1_SAPC})	2	3	1	3	1	2
Q_1^+ ($i_{z1_SAPC}^{+r}$)	3	2	3	1	2	1

Tabla 4-16. Secuencias de compensación para las potencias ineficientes de la carga.

La columna de la izquierda corresponde a las potencias ineficientes que la carga demanda con su respectiva corriente de compensación. Las columnas de la derecha corresponden a las secuencias de compensación selectiva. La secuencia S2, por ejemplo, consiste en utilizar el SAPC para compensar primero $S_{eN\#}$, luego compensar Q_1^+ , y finalmente $S_{U1\#}$ si queda disponible potencia aparente del SAPC. El algoritmo propuesto, de acuerdo a la secuencia de compensación y a la potencia aparente disponible en el SAPC (S_{SAPC}), le dará valores a cada uno de los coeficientes.

La S_{SAPC} en algunas ocasiones permitirá la compensación de uno o varios efectos. Para esto se han tenido en cuenta 4 posibilidades, explicadas a continuación y mostradas en la figura 4-29:

1. Que el SAPC sea capaz de suministrar la corriente necesaria para compensar sólo una o parte de una de las potencias ineficientes de la carga.
2. Que el SAPC sea capaz de suministrar la corriente necesaria para compensar la totalidad de una de las potencias ineficientes de la carga, y la segunda o parte de la segunda potencia ineficiente de la carga.
3. Que el SAPC sea capaz de suministrar la corriente necesaria para compensar la totalidad de dos de las potencias ineficientes de la carga, y sólo una parte de la tercera potencia ineficiente de la carga.
4. Que el SAPC sea capaz de suministrar la corriente necesaria para compensar todas las potencias ineficientes de la carga, lo que corresponde al modo de compensación global.

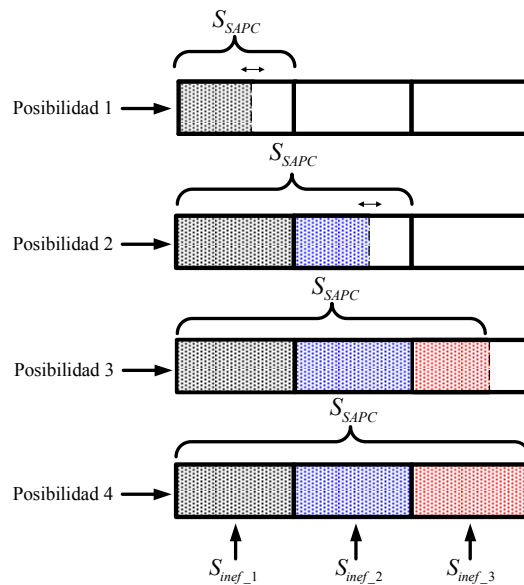


Figura 4-29. Posibilidades de compensación de potencia de acuerdo a la S_{SAPC} .

En el algoritmo explicado a continuación no se considerará aún una secuencia específica de compensación de las potencias ineficientes. Se considerará el funcionamiento del algoritmo de acuerdo a la potencia máxima disponible en el SAPC. Para esto, $i_{z_SAPC_1}$, $i_{z_SAPC_2}$, e $i_{z_SAPC_3}$ son definidas para referirse a las corrientes no eficientes en cualquiera de las secuencias indicadas en la tabla 4-16. Se utilizará K_1 , K_2 , y K_3 para denotar respectivamente el primer, segundo y tercer coeficiente para cada una de las corrientes de compensación.

Para encontrar las corrientes de compensación escaladas cuando existe limitación de potencia en el SAPC se propone el algoritmo del flujograma de la figura 4-30. El algoritmo determina las corrientes de compensación de acuerdo a la potencia máxima disponible en el SAPC. Para esto el algoritmo tiene cuatro funciones internas que contemplan las posibilidades de la figura 4-29 y que son llamadas “Posibilidad 1”, “Posibilidad 2”, “Posibilidad 3”, y “Posibilidad 4”. El algoritmo es descrito en los siguientes pasos:

1. Para poder iniciar la ejecución del algoritmo, se mide y almacena en el buffer circular un periodo completo de las corrientes de la carga (i_{z_load}).
2. De la tabla 4-1 se obtienen cada una de las corrientes de compensación por fase y por ineficiencia (i_{zH_SAPC} , i_{zU1_SAPC} , e $i_{z1_SAPC}^{+r}$). Simultáneamente, sumando a i_{zH_SAPC} , i_{zU1_SAPC} , e $i_{z1_SAPC}^{+r}$ se calcula a i_{z_SAPC} mediante la ecuación (4.6). Esto se realiza en el último instante de tiempo muestreado y teniendo en cuenta la información del último periodo de tiempo almacenado.
3. Se verifica si el SAPC tiene potencia suficiente para realizar la compensación global. Para esto, se obtienen los valores máximos por periodo de i_{z_SAPC} para cada fase ($I_{z_SAPC_max}$).
4. Se compara $I_{z_SAPC_max}$ con el valor máximo nominal de corriente del SAPC ($I_{MAXSAPC}$) para cada una de las fases. En el caso de que en todas las fases se verifique ($I_{z_SAPCmax} \leq I_{MAXSAPC}$) no se requiere el escalado de las corrientes de compensación, y en este caso se ejecuta la función “Posibilidad 4” con la que se compensan todas las potencias ineficientes provocadas por la carga. En el caso de que en alguna de las fases se verifique ($I_{z_SAPC_max} > I_{MAXSAPC}$), no existe S_{SAPC} suficiente para compensar todas las potencias ineficientes provocadas por la carga y se debe empezar a comprobar la disponibilidad de potencia en el SAPC para compensar parcialmente las potencias ineficientes provocadas por la carga.
5. Este paso se ejecuta si no existe potencia suficiente en el SAPC para compensar todas las potencias ineficientes provocadas por la carga. Teniendo en cuenta la secuencia de compensación, el algoritmo debe comprobar si existe o no potencia suficiente en el SAPC para compensar la primera potencia de la secuencia de compensación. Para esto se debe actuar sobre $i_{z_SAPC_1}$ obteniéndose su valor máximo por periodo ($I_{z_SAPC_1max}$).

6. Se compara $I_{z_SAPC_1max}$ con $I_{MAXSAPC}$ para las tres fases. En el caso de que en alguna de las fases se verifique ($I_{z_SAPC_1max} > I_{MAXSAPC}$) sólo existe la potencia en el SAPC para compensar parcialmente una de las potencias ineficientes de la carga, en este caso se ejecuta la función “Posibilidad 1” para encontrar los coeficientes. En el caso de que en todas las fases se verifique ($I_{z_SAPC_1max} \leq I_{MAXSAPC}$) existe capacidad disponible para compensar la totalidad de la primera potencia ineficiente y parte de las otras dos potencias ineficientes.
7. Este paso se ejecuta si existe potencia suficiente en el SAPC para compensar la totalidad de la primera potencia ineficiente y parte de las otras dos potencias ineficientes. Teniendo en cuenta la secuencia de compensación, el algoritmo debe comprobar si existe o no potencia suficiente en el SAPC para compensar la primera y la segunda potencia de la secuencia de compensación. Para esto, se calcula la corriente instantánea para un periodo completo de la señal fundamental correspondiente a la suma de $i_{z_SAPC_1}$ e $i_{z_SAPC_2}$ ($i_{z_SAPC_1+2}$).
8. Se obtiene el valor máximo por periodo de tiempo de $i_{z_SAPC_1+2}$ ($I_{z_SAPC_1+2max}$) para cada una de las fases. Los instantes de tiempo donde ocurre $I_{z_SAPC_1+2max}$ para cada fase son definidos como t_{z_max} . No se debe cometer el error de encontrar el valor máximo de $i_{z_SAPC_1}$ y de $i_{z_SAPC_2}$ y luego sumarlos para obtener $I_{z_SAPC_1+2max}$, ya que los valores máximos de $i_{z_SAPC_1}$, $i_{z_SAPC_2}$, e $i_{z_SAPC_1+2}$ pueden ocurrir en instantes de tiempo diferentes.
9. Se compara $I_{z_SAPC_1+2max}$ con la corriente nominal del SAPC ($I_{MAXSAPC}$) para las tres fases. En el caso de que en alguna de las fases se verifique ($I_{z_SAPC_1+2max} > I_{MAXSAPC}$) existe suficiente potencia en el SAPC para compensar una de las potencias y parcialmente la segunda. En este caso se ejecuta la función “Posibilidad 2” para encontrar los coeficientes. En el caso de que en todas las fases se verifique ($I_{z_SAPC_1+2max} \leq I_{MAXSAPC}$) existe suficiente potencia en el SAPC para compensar la totalidad de las dos primeras potencias y parcialmente la tercera. En este caso se ejecuta la función “Posibilidad 3” para encontrar los coeficientes.
10. Después de obtener los coeficientes con las funciones “Posibilidad 1”, “Posibilidad 2”, “Posibilidad 3”, y “Posibilidad 4”. Se escalan las corrientes de compensación de acuerdo a la ecuación (4.44).
11. Se obtiene una nueva muestra y se almacena en el buffer circular con ayuda del método de la ventana deslizante. Se retorna al paso 2 del algoritmo.

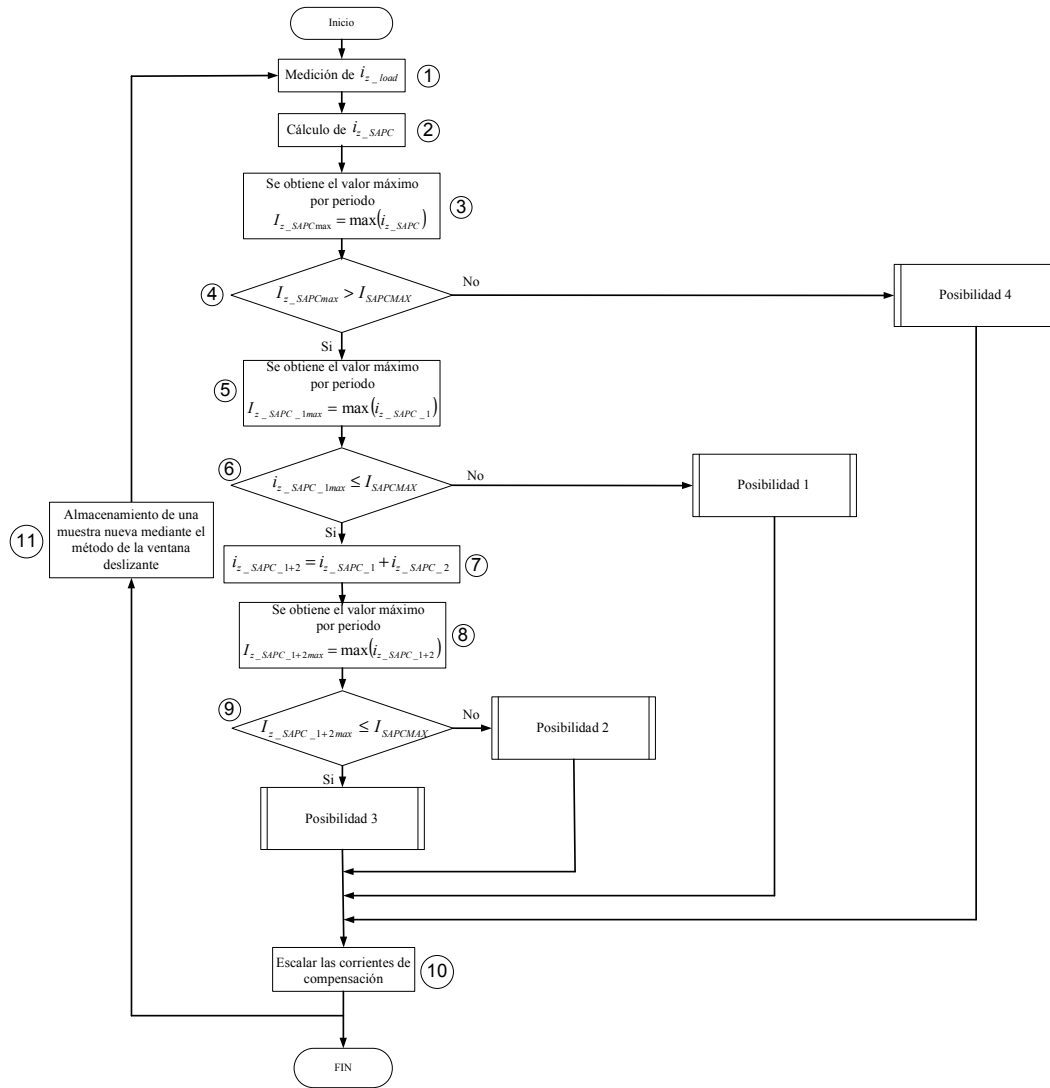


Figura 4-30. Flujograma del algoritmo para encontrar las corrientes de compensación escaladas usando la estrategia de compensación selectiva en SAPC's con limitación de potencia.

Básicamente, las funciones “Posibilidad 1”, “Posibilidad 2”, “Posibilidad 3”, y “Posibilidad 4” se utilizan para calcular los coeficientes de compensación de acuerdo a la potencia disponible en el SAPC. Estas funciones serán explicadas con mayor detalle en las siguientes secciones.

4.4.2.1. Función “Posibilidad 1”.

Para que esta función se ejecute se requiere que se verifique ($I_{z_SAPC_1max} > I_{SAPC_MAX}$). En este caso, el SAPC sólo es capaz de suministrar parcialmente $i_{z_SAPC_1}$, mientras que $i_{z_SAPC_2}$, e $i_{z_SAPC_3}$ no pueden ser compensadas.

La función “Posibilidad 1” cuyo flujograma puede verse en la figura 4-31 tiene los siguientes pasos:

1. Se calculan los coeficientes para las tres fases (K_{z1}). K_{z1} debe ser un valor entre 0 y 1:

$$K_{z1} = \frac{I_{MAXSAPC}}{I_{z_SAPC_1max}} \quad (4.45)$$

2. Se encuentra el valor mínimo entre los tres coeficientes $K_1 = \min(K_{a1}, K_{b1}, K_{c1})$.
3. Los coeficientes que modifican a $i_{z_SAPC_1}$ adoptan el valor mínimo obtenido ($K_{a1} = K_{b1} = K_{c1} = K_1$). Los coeficientes correspondientes a $i_{z_SAPC_2}$, e $i_{z_SAPC_3}$ se les asigna el valor de 0 en todas las fases, ya que no pueden ser compensadas ($K_2 = K_3 = 0$).
4. Se retorna al algoritmo principal.

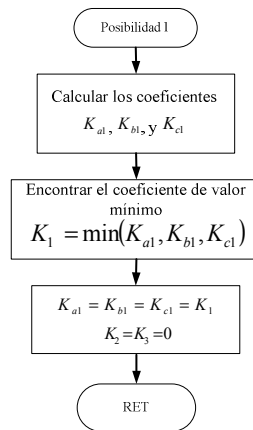


Figura 4-31. Función “Posibilidad 1” utilizada para encontrar los coeficientes de escalado de las corrientes de compensación.

Para comprobar esta función se han realizado simulaciones en Matlab-Simulink. Se tendrá en cuenta la carga descrita en las tablas 4-3, 4-4, y 4-9 incluyendo los fenómenos de desfase, desequilibrio, y distorsión. El SAPC es programado para que trabaje de modo selectivo, ver figura 4-32.

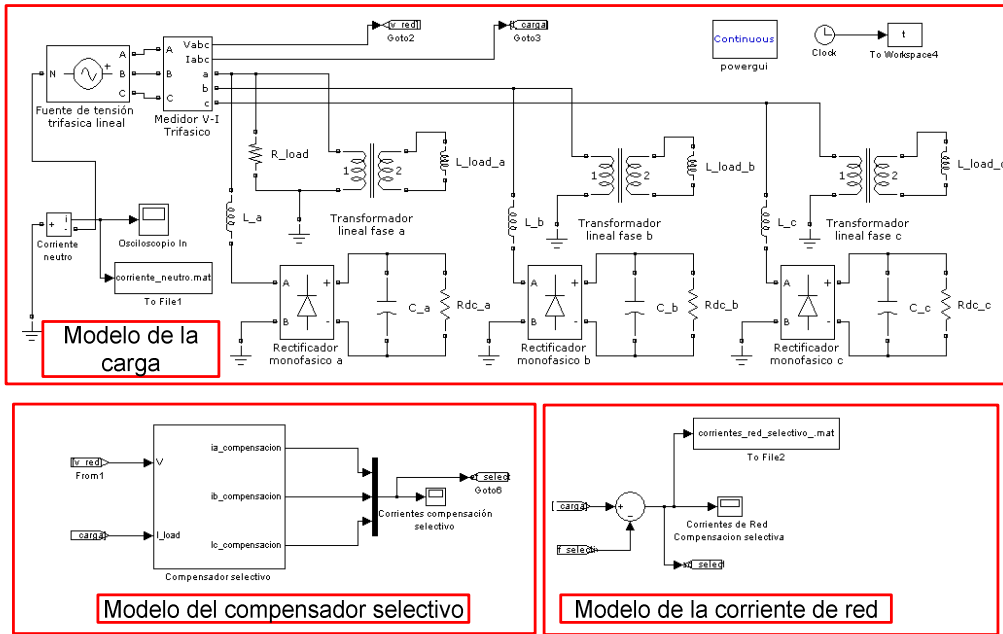


Figura 4-32. Modelo de Matlab-Simulink del compensador selectivo de corrientes ineficientes bajo estudio.

Las formas de onda de las corrientes de la carga corresponden a las formas de onda de la figura 4-18. En la tabla 4-10 fueron resumidos los valores rms de las componentes armónicas de las corrientes de la carga y sus THD_I 's. En la tabla 4-11 fueron resumidos las principales magnitudes de potencia demandadas por la carga.

La S-function del SAPC es programada para que trabaje con el algoritmo propuesto en esta sección. Se le ha impuesto un límite de 2 A rms ($2.83 A_{pico}$) a las corrientes de compensación del SAPC. Se utilizará la secuencia de compensación de potencia S1 ($S_{eN\#}-S_{U1\#}-Q_1^+$). En la figura 4-33, se muestran las corrientes de compensación calculadas en el paso 2 del algoritmo principal de la figura 4-30 para la fase a .

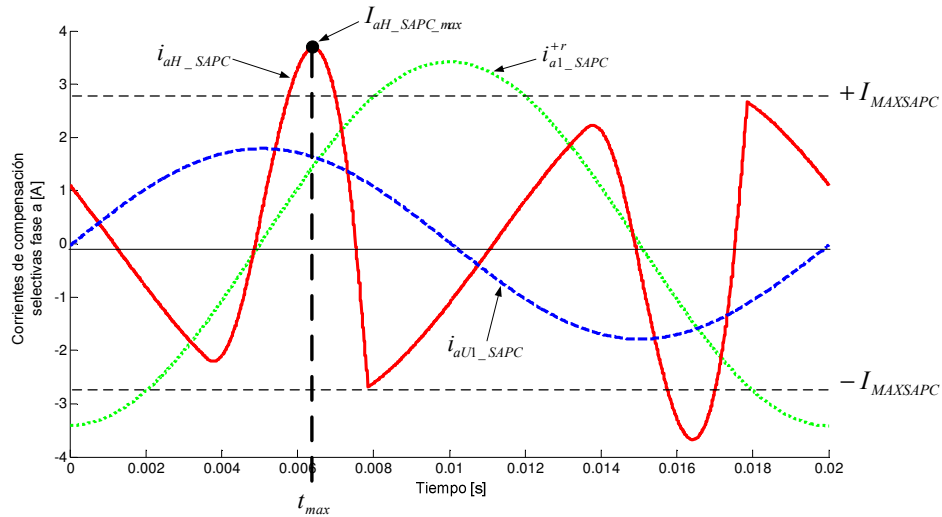


Figura 4-33. Corrientes de compensación para la fase a sin escalar.

De acuerdo a la secuencia de compensación de potencia S1, se debe compensar inicialmente i_{aH_SAPC} . El valor máximo de i_{aH_SAPC} es $I_{aH_SAPC_max}$. Este valor de $I_{aH_SAPC_max}$ es mayor que $I_{MAXSAPC}$, por lo que el algoritmo ejecuta la función “Posibilidad 1”. En este caso, i_{zH_SAPC} es parcialmente compensada y las corrientes i_{zU1_SAPC} , e $i_{z1^+_SAPC}$ no son compensadas. El coeficiente K_H toma el valor de 0.76, mientras que K_U y K_Q toman el valor de 0. Las corrientes escaladas para la fase a pueden verse en la siguiente figura.

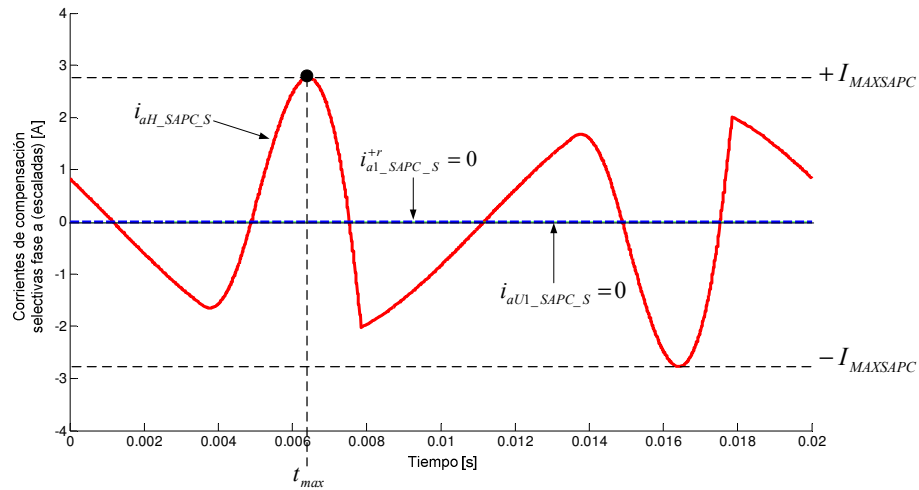


Figura 4-34. Corrientes de compensación para la fase a escaladas.

Tras el escalado, las corrientes de compensación ($i_{zH_SAPC_S}$, $i_{zU1_SAPC_S}$, e $i_{z1^+_SAPC_S}$) no superan a $I_{MAXSAPC}$. El valor máximo de $i_{zH_SAPC_S}$ coincide con $I_{MAXSAPC}$ en el instante t_{max} , mientras que

$i_{zU1_SAPC_S}$, e $i_{z1_SAPC_S}^{+r}$ son cero. En la figura 4-35 puede verse las corrientes de red antes y durante la compensación.

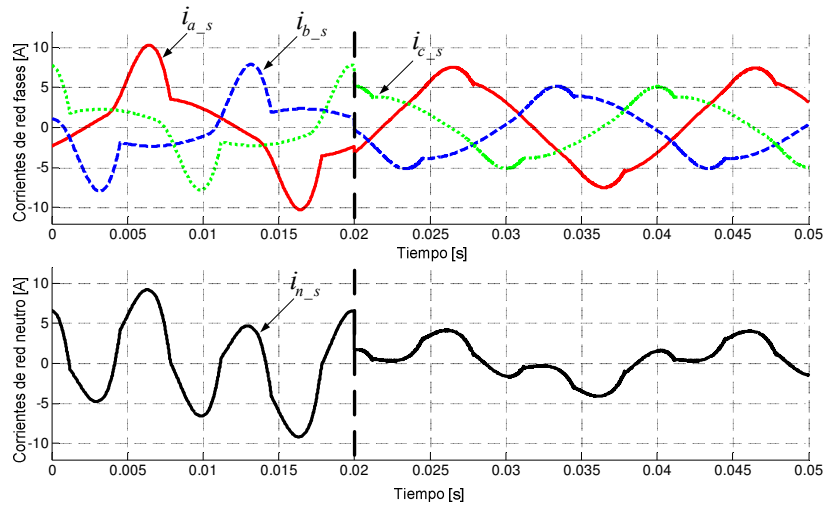


Figura 4-35. Corrientes de red antes y durante la compensación.

La figura 4-35 está dividida en dos por una línea vertical punteada en el instante de tiempo de 0.02 s. En la parte izquierda se pueden ver las corrientes de red antes de la compensación y en la parte derecha se pueden ver las corrientes de red después de la compensación. Tras la compensación el valor máximo de las corrientes de red (fases y neutro) se reducen considerablemente. En la figura 4-36 se muestra el espectro armónico de las corrientes rms para las fases de la red antes y durante la compensación y en la figura 4-37 se muestra el espectro armónico de la corriente rms para el neutro de la red antes y durante la compensación. En la tabla de 4-21 se muestran los valores rms de las componentes armónicas de las corriente de red (fases y neutro) y sus THD_I durante la compensación.

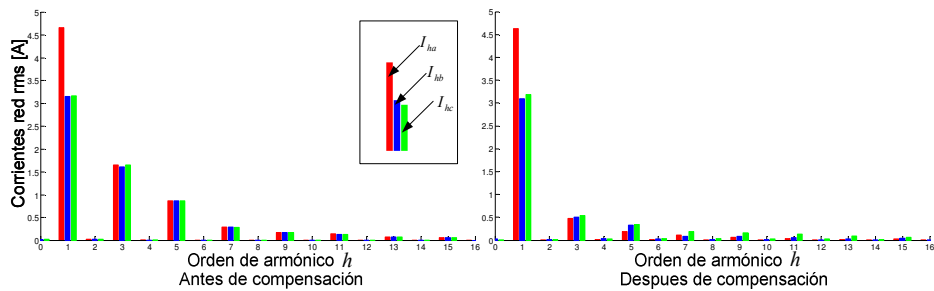


Figura 4-36. Espectros armónicos para las corrientes rms de la red (fases a , b , y c) antes y durante la compensación.

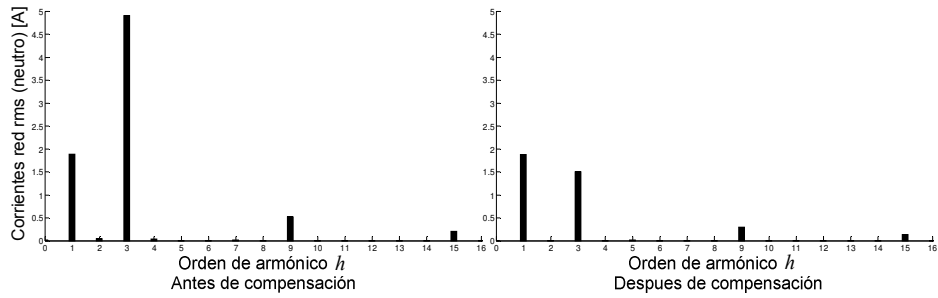


Figura 4-37. Espectros armónicos para la corriente rms de neutro de la red antes y durante la compensación.

$I_{a1} = 4.64 \text{ A}$	$I_{a3} = 0.47 \text{ A}$	$I_{a5} = 0.18 \text{ A}$	$I_{a7} = 0.11 \text{ A}$	$I_{a9} = 0.06 \text{ A}$	$I_{a11} = 0.03 \text{ A}$	$I_{a13} = 0.01 \text{ A}$	$I_{a15} = 0.03 \text{ A}$	$THD_{Ia} = 11.2\%$
$I_{b1} = 3.10 \text{ A}$	$I_{b3} = 0.49 \text{ A}$	$I_{b5} = 0.33 \text{ A}$	$I_{b7} = 0.08 \text{ A}$	$I_{b9} = 0.08 \text{ A}$	$I_{b11} = 0.05 \text{ A}$	$I_{b13} = 0.03 \text{ A}$	$I_{b15} = 0.04 \text{ A}$	$THD_{Ib} = 19.5\%$
$I_{c1} = 3.10 \text{ A}$	$I_{c3} = 0.49 \text{ A}$	$I_{c5} = 0.33 \text{ A}$	$I_{c7} = 0.08 \text{ A}$	$I_{c9} = 0.08 \text{ A}$	$I_{c11} = 0.05 \text{ A}$	$I_{c13} = 0.03 \text{ A}$	$I_{c15} = 0.04 \text{ A}$	$THD_{Ic} = 19.5\%$
$I_{n1} = 1.88 \text{ A}$	$I_{n3} = 1.50 \text{ A}$	$I_{n5} = 0.01 \text{ A}$	$I_{n7} = 0 \text{ A}$	$I_{n9} = 0.2 \text{ A}$	$I_{n11} = 0.3 \text{ A}$	$I_{n13} = 0 \text{ A}$	$I_{n15} = 0.13 \text{ A}$	$THD_{In} = 82.4\%$
$I_a = 4.67 \text{ A}$		$I_b = 3.16 \text{ A}$		$I_c = 3.16 \text{ A}$		$I_n = 2.43 \text{ A}$		
$I_1^+ = 3.62 \text{ A}$			$I_1^{+a} = 2.7 \text{ A}$			$I_1^{+r} = 2.41 \text{ A}$		
$I_1^- = 0.65 \text{ A}$			$I_1^0 = 0.61 \text{ A}$			$I_{U1\#} = 0.89 \text{ A}$		
$I_{aH} = 0.52 \text{ A}$		$I_{bH} = 0.61 \text{ A}$		$I_{cH} = 0.61 \text{ A}$		$I_{nH} = 1.55 \text{ A}$		
$I_{e\#} = 3.73 \text{ A}$		$I_{e1\#} = 3.69 \text{ A}$		$I_{eH\#} = 0.58 \text{ A}$		$THD_{e1\#} = 15.67\%$		

Tabla 4-17. Corrientes de red y sus THD_i 's durante la compensación.

Si se comparan la tabla 4-10 (antes de la compensación) y la tabla 4-17 (durante la compensación) se concluye que tras la compensación sucede lo siguiente:

- Las corrientes de red (fases y neutro) fundamentales antes y durante la compensación permanecen prácticamente constantes. El algoritmo, en este caso, no actúa sobre las corrientes fundamentales ineficientes que demanda la carga.
- En términos generales, la distorsión de corriente disminuye. El THD_{Ia} se reduce de 40.7 % a 11.2 %, el THD_{Ib} se reduce de 59.3 % a 19.5 %, el THD_{Ic} se reduce de 59.8 % a 19.5 %, el THD_{In} se reduce de 261 % a 82.4 %, y el $THD_{e1\#}$ se reduce de 49.18 % a 15.67 %. El algoritmo actúa sobre las componentes de corriente no fundamentales que demanda la carga.
- Las corrientes armónicas antes y durante la compensación se encuentran equilibradas. Las componentes de corriente armónica que circulan por el neutro disminuyen y además no aparecen otras componentes de corriente diferentes a las que ya existían.

En la tabla 4-18 se encuentran resumidas las principales magnitudes de potencia suministradas por la red tras la compensación.

$S_{e\#} = 1398.94 \text{ VA}$					
$S_{e1\#} = 1382.07 \text{ VA}$			$S_{eN\#} = 216.6 \text{ VA}$		
$S_1^+ = 1360.28 \text{ VA}$		$S_{U1\#} = 244.45 \text{ VA}$	$D_{el\#} = 216.6 \text{ VA}$	$S_{eH\#} = 0 \text{ VA}$	$D_{eV\#} = 0 \text{ VA}$
$P_1^+ = 1016.37 \text{ W}$	$Q_1^+ = 904.08 \text{ var}$				

Tabla 4-18. Magnitudes de potencia suministradas por la red tras la compensación.

Si se comparan la tabla 4-11 (antes de la compensación) y la tabla 4-18 (durante la compensación) se obtiene que tras la compensación:

- La red suministra menor cantidad de potencia aparente efectiva ($S_{e\#}$) disminuyendo de 1541.7 VA a 1398.94 VA. El algoritmo reduce las potencias ineficientes en el sistema eléctrico de potencia.
- La potencia aparente efectiva fundamental ($S_{e1\#}$) permanece prácticamente igual. Las potencias que componen $S_{e1\#}$ (P_1^+ , Q_1^+ , y $S_{U1\#}$) también permanecen prácticamente constantes. El SAPC no compensa potencias fundamentales, esto se debe a que K_U y K_Q son cero.
- La potencia aparente efectiva no fundamental ($S_{eN\#}$) es parcialmente compensada disminuyendo de 680.41 VA a 216.6 VA, esto se debe a que K_H es 0.76.

La función “Posibilidad 1” analizada en esta sección, combinada con la secuencia S1 de compensación, sólo compensa parcialmente $S_{eN\#}$, mientras que las potencias Q_1^+ , y $S_{U1\#}$ no son compensadas. Además, el SAPC no inyecta componentes armónicas a la red de distribución ni realiza una compensación desequilibrada de las potencias de la carga. Con estos resultados se validan mediante simulación la función “Posibilidad 1”.

4.4.2.2. Función “Posibilidad 2”.

Esta función se ejecuta tras haber comprobado que puede compensarse completamente la primera de las ineficiencias elegidas según la secuencia elegida de la tabla 4-16 ($I_{z_SAPC_1max} \leq I_{SAPC_MAX}$) y que no puede compensarse completamente la segunda de las ineficiencias ($I_{z_SAPC_1+2max} > I_{SAPC_MAX}$). El SAPC dispone de suficiente corriente de salida para suministrar $i_{z_SAPC_1}$, y parte de $i_{z_SAPC_2}$, mientras que $i_{z_SAPC_3}$ no puede ser compensada. Estas condiciones indican que $K_1=1$, $0 < K_2 < 1$, y $K_3=0$. Esta función básicamente se centra en encontrar K_2 , su flujograma puede verse en la figura 4-38 y los diversos pasos se explican a continuación:

1. Determinar el instante de tiempo t_{z_max} donde $i_{z_SAPC_1+2}$ se hace máxima ($I_{z_SAPC_1+2}$).

2. Obtener $i_{z_SAPC_1}$ e $i_{z_SAPC_2}$ en t_{z_max} ($i_{z_SAPC_1}(t_{z_max})$ e $i_{z_SAPC_2}(t_{z_max})$), en el que se cumple la siguiente relación:

$$I_{z_SAPC_1+2} = i_{z_SAPC_1}(t_{z_max}) + i_{z_SAPC_2}(t_{z_max}) \quad (4.46)$$

3. Sabiendo que existe corriente suficiente para compensar $i_{z_SAPC_1}$, calcular la corriente que queda disponible en t_{z_max} para compensar parcialmente $i_{z_SAPC_2}$. ($i_{z_disponible}(t_{z_max})$). Para esto se utiliza la siguiente expresión.

$$i_{z_disponible}(t_{z_max}) = I_{MAXSAPC} - i_{z_SAPC_1}(t_{z_max}) \quad (4.47)$$

4. Se calcula K_{z2} para las tres fases utilizando $i_{z_disponible}(t_{z_max})$ como sigue:

$$K_{z2} = \frac{i_{z_disponible}(t_{z_max})}{i_{z_SAPC_2}(t_{z_max})} \quad (4.48)$$

Con K_{z2} de la anterior ecuación y teniendo en cuenta que $K_{z1}=1$ y $K_{z3}=0$, se garantiza que tras escalar las corrientes de compensación ($i_{z_SAPC_S}$) no se supera a $I_{SAPCMAX}$ en ningún instante de tiempo.

$$i_{z_SAPC_S} = K_{z1} \cdot i_{z_SAPC_1} + K_{z2} \cdot i_{z_SAPC_2} + K_{z3} \cdot i_{z_SAPC_3} \leq I_{SAPCMAX} \quad (4.49)$$

5. Se encuentra el valor mínimo entre los coeficientes obtenidos para las tres fases: $K_2 = \min(K_{a2}, K_{b2}, K_{c2})$.
6. Los coeficientes que modifican a $i_{z_SAPC_2}$ adoptan el valor mínimo obtenido ($K_{a2}=K_{b2}=K_{c2}=K_2$), los coeficientes que modifican a $i_{z_SAPC_1}$ adoptan el valor de 1 ($K_1=1$), y los coeficientes que modifican a $i_{z_SAPC_3}$ adoptan el valor de 0 ($K_3=0$).
7. Se retorna al algoritmo principal.

Es importante no confundir $i_{z_SAPC_1}(t_{max})$ e $i_{z_SAPC_2}(t_{max})$ con los valores donde $i_{z_SAPC_1}$ e $i_{z_SAPC_2}$ se hacen máximos.

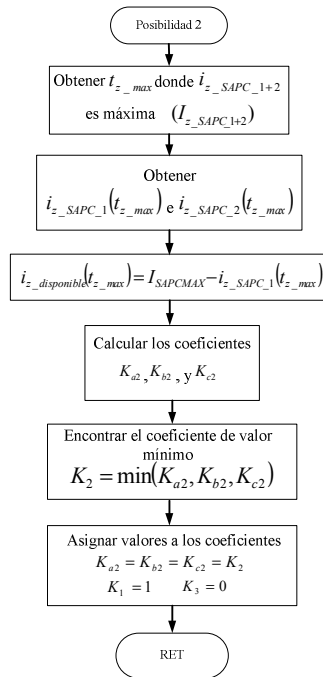


Figura 4-38. Función “Posibilidad 2” utilizado para encontrar los coeficientes de escalado de las corrientes de compensación.

Para comprobar esta función se han realizado simulaciones en Matlab-Simulink. Se tendrá en cuenta la carga el modelo de la figura 4-32. Las formas de onda de la corriente de la carga se representaron en la figura 4-18. En la tabla 4-10, se resumen los valores rms de las componentes armónicas de la carga. En la tabla 4-11, se resumen las magnitudes de potencias demandadas por la carga.

El SAPC es programado para que trabaje de modo selectivo. La S-function del SAPC es programada para que trabaje con el algoritmo propuesto en esta sección. Se le ha impuesto un límite de 3 A rms ($4.24 A_{pico}$) a las corrientes de compensación del SAPC. Se utilizará la secuencia de compensación de potencia S3 (Q_1^+ , $S_{eN\#}$, $S_{U1\#}$). En el paso 2 del algoritmo principal (Figura 4-30), se obtienen las corrientes de compensación necesarias para suministrarle a la carga las corrientes ineficientes que demanda. Estas corrientes de compensación incluyen los fenómenos de desfase, desequilibrio, distorsión y pueden verse para un periodo completo de la señal fundamental en la figura 4-39.

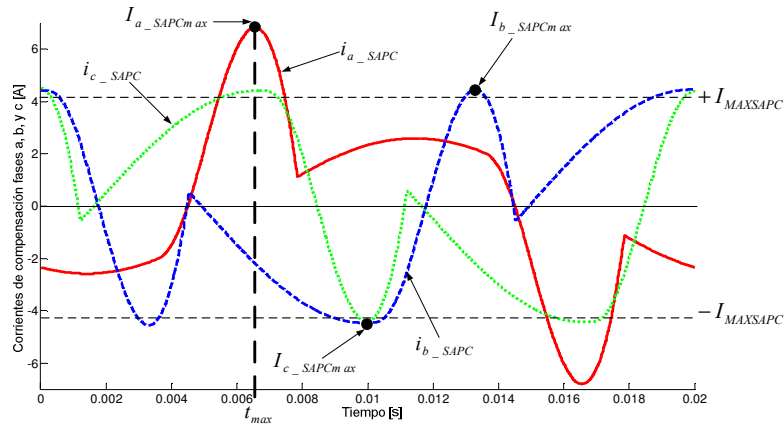


Figura 4-39. Corrientes de compensación sin escalar.

En la figura 4-39 puede verse que las corrientes de compensación de las tres fases superan a $I_{MAXSAPC}$. Si se sigue el algoritmo de la figura 4-30 para este caso, en el paso 4 se descarta la función “Posibilidad 4” o compensación global ($I_{z_SAPC} > I_{SAPC_MAX}$). Las funciones “Posibilidad 1”, “Posibilidad 2”, y “Posibilidad 3” que contemplan el escalado de i_{a_SAPC} , i_{b_SAPC} , e i_{c_SAPC} deben ser evaluadas, debiendo encontrar los coeficientes de escalado de las corrientes de compensación (K_H , K_U , y K_Q). Los coeficientes K_H , K_U , y K_Q deben ser constantes para un periodo completo de la señal fundamental y únicos para las tres fases. El criterio para elegir los coeficientes radica en encontrar el coeficiente de valor mínimo entre los coeficientes de las tres fases. Teniendo en cuenta, en el caso analizado, que el valor máximo de i_{a_SAPC} ($I_{a_SAPCmax}$) es mayor que los valores máximos de i_{b_SAPC} , e i_{c_SAPC} ($I_{b_SAPCmax}$, e $I_{c_SAPCmax}$ respectivamente), los coeficientes de menor valor se presentan en la fase a . En la figura 4-40 se muestran los componentes de corriente en la fase a que permiten evaluar las funciones “Posibilidad 1”, “Posibilidad 2”, y “Posibilidad 3”.

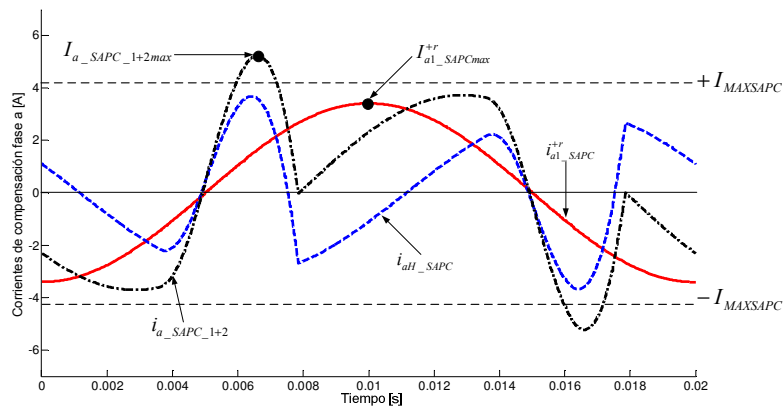


Figura 4-40. Corrientes de compensación para la fase a (Evaluación de funciones “Posibilidad 1”, “Posibilidad 2”, y “Posibilidad 3”).

De acuerdo a la secuencia de compensación elegida S3 (Q_1^+ , $S_{eN\#}$, $S_{U1\#}$), el algoritmo, en el paso 6, verifica si es o no capaz de compensar la totalidad de $i_{a1_SAPC}^{+r}$. Para esto, se compara el valor máximo de $i_{a1_SAPC}^{+r}$ ($I_{a1_SAPCmax}^{+r}$) con $I_{MAXSAPC}$. Se cumple que $I_{a1_SAPCmax}^{+r} \leq I_{MAXSAPC}$ y por tanto el SAPC es capaz de compensar la totalidad de $i_{a1_SAPC}^{+r}$, por lo que el algoritmo descarta la función “Posibilidad 1”. A continuación el algoritmo evalúa si el SAPC es capaz de compensar o no las dos primeras corrientes de la secuencia de compensación. Para esto, el algoritmo obtiene para un periodo completo de la señal fundamental $i_{a_SAPC_1+2}$, que corresponde a la suma de $i_{a1_SAPC}^{+r}$ e i_{aH_SAPC} . En el paso 9, se compara el valor máximo de $i_{a_SAPC_1+2}$ ($I_{a_SAPC_1+2max}$) con $I_{MAXSAPC}$. Al verificar que $I_{a_SAPC_1+2max} \geq I_{MAXSAPC}$, el SAPC es capaz de compensar la totalidad de $i_{a1_SAPC}^{+r}$ pero sólo una parte de i_{aH_SAPC} . El algoritmo ejecuta la función “Posibilidad 2”.

En la figura 4-41 se muestran las corrientes de compensación que intervienen en el cálculo de los coeficientes. En la figura 4-42 se realiza un zoom al recuadro para explicar con mayor claridad el algoritmo de la función “Posibilidad 2”.

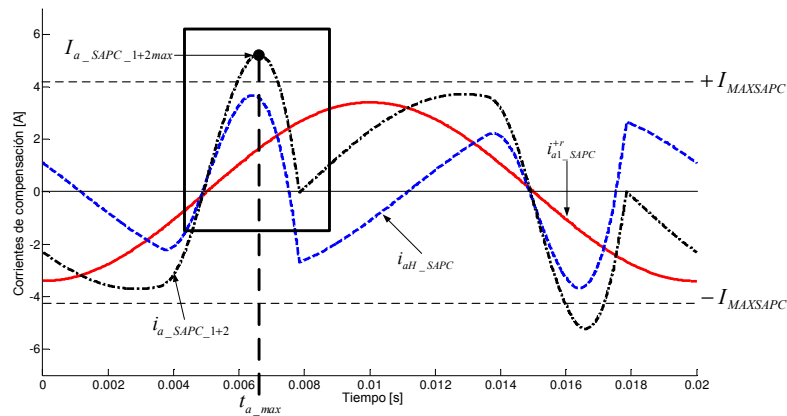


Figura 4-41. Corrientes de compensación que intervienen en el cálculo de los coeficientes de escalado (fase a).

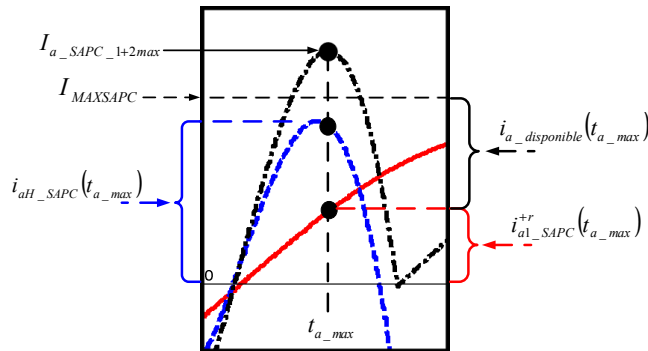


Figura 4-42. Zoom recuadro figura 4-42.

En el instante t_{a_max} se puede ver que existe suficiente corriente para compensar completamente $i_{a1_SAPC}^{+r}$. La corriente que queda disponible para compensar i_{aH_SAPC} se calcula usando la ecuación (4.49) como sigue:

$$i_{a_disponible}(t_{a_max}) = I_{MAXSAPC} - i_{a1_SAPC}^{+r}(t_{z_max}) \quad (4.50)$$

El coeficiente K_Q para compensar Q_1^+ se le asigna el valor de 1. En este caso, la corriente $i_{a1_SAPC}^{+r}$ es inyectada por el SAPC a la carga en su totalidad. El coeficiente K_U para compensar $S_{U1\#}$ se le asigna el valor de 0, por lo que, la corriente i_{U1_SAPC} no es inyectada a la carga. El coeficiente K_{aH} es calculado con la ecuación (4.51) como sigue:

$$K_{aH} = \frac{i_{a_disponible}(t_{a_max})}{i_{aH_SAPC}(t_{a_max})} \quad (4.51)$$

El algoritmo también es ejecutado en las fases b y c . Se compararon los coeficientes para las tres fases obteniendo los coeficientes de valor mínimo. Para el caso analizado, los coeficientes de escalado de valor mínimo son $K_Q=1$, $K_H=0.72$, y $K_U=0$. Las corrientes de compensación escaladas para la fase a se muestran en la figura 4-43.

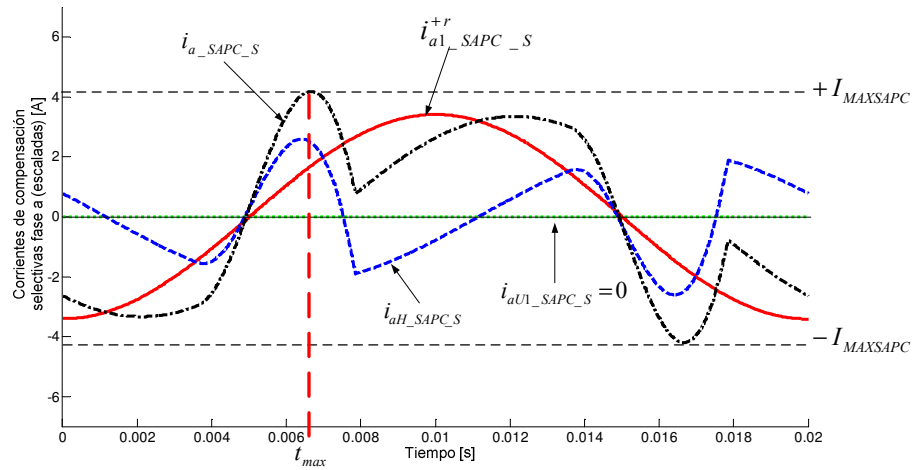


Figura 4-43. Corrientes de compensación selectivas fase a escaladas.

Tras el escalado, las corrientes de compensación $i_{z_SAPC_S}$ no superan a $I_{MAXSAPC}$ en ningún instante de tiempo. En la figura 4-44 puede verse las corrientes de red antes y durante la compensación.

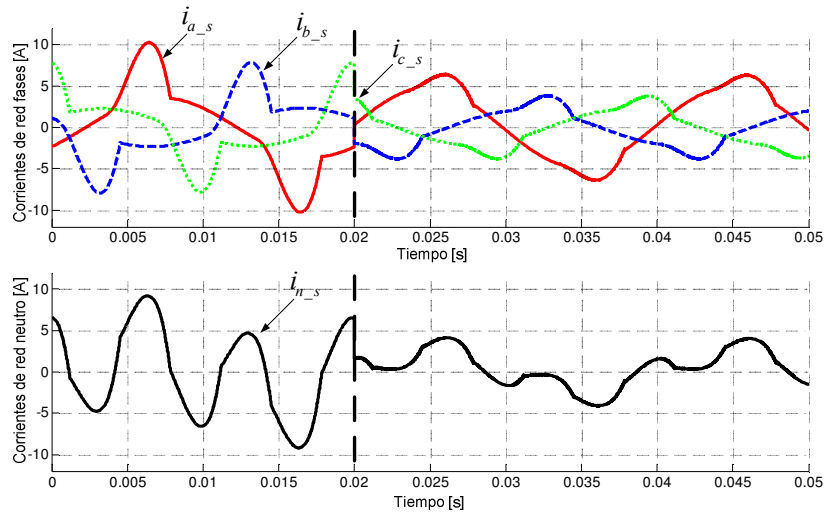


Figura 4-44. Corrientes de red antes y durante la compensación.

Tras la compensación el valor máximo de las corrientes de red (fases y neutro) se reduce considerablemente. En la figura 4-45 se muestra el espectro armónico de las corrientes rms para las fases de la red antes y durante la compensación. En la figura 4-46 se muestra el espectro armónico de la corriente rms para el neutro de la red antes y durante la compensación. En la tabla de 4-19 se muestran los valores rms de las componentes armónicas de las corriente de red (fases y neutro) y sus THD_i 's durante la compensación.

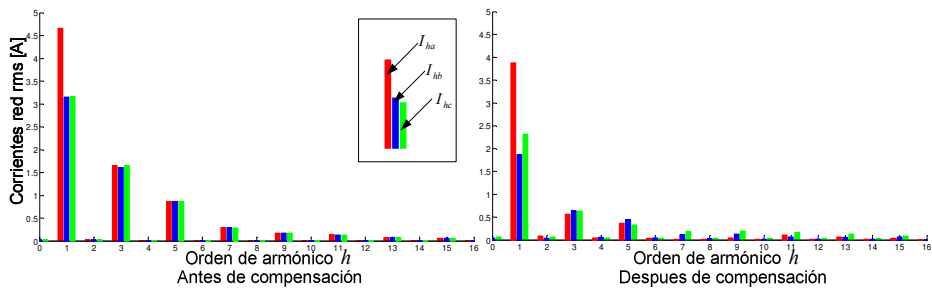


Figura 4-45. Espectros armónicos para las corrientes rms de la red (fases a , b , y c) antes y durante la compensación.

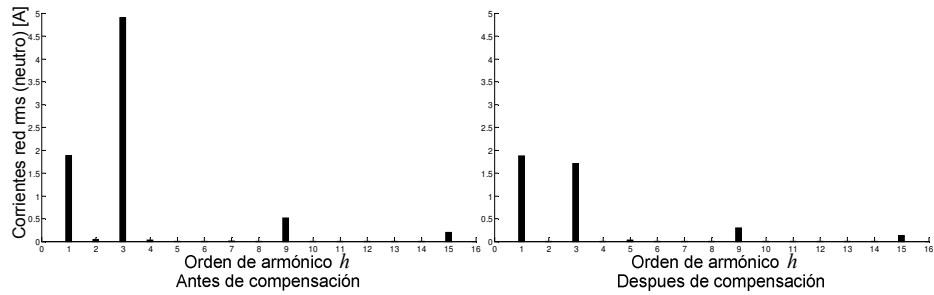


Figura 4-46. Espectros armónicos para la corriente rms de neutro de la red antes y durante la compensación.

$I_{a1} = 3.9 \text{ A}$	$I_{a3} = 0.56 \text{ A}$	$I_{a5} = 0.35 \text{ A}$	$I_{a7} = 0.01 \text{ A}$	$I_{a9} = 0.05 \text{ A}$	$I_{a11} = 0.1 \text{ A}$	$I_{a13} = 0.06 \text{ A}$	$I_{a15} = 0.03 \text{ A}$	$THD_{Ia} = 12.5\%$
$I_{b1} = 1.99 \text{ A}$	$I_{b3} = 0.63 \text{ A}$	$I_{b5} = 0.43 \text{ A}$	$I_{b7} = 0.11 \text{ A}$	$I_{b9} = 0.12 \text{ A}$	$I_{b11} = 0.06 \text{ A}$	$I_{b13} = 0.06 \text{ A}$	$I_{b15} = 0.06 \text{ A}$	$THD_{Ib} = 25.2\%$
$I_{c1} = 2.1 \text{ A}$	$I_{c3} = 0.63 \text{ A}$	$I_{c5} = 0.32 \text{ A}$	$I_{c7} = 0.18 \text{ A}$	$I_{c9} = 0.19 \text{ A}$	$I_{c11} = 0.16 \text{ A}$	$I_{c13} = 0.11 \text{ A}$	$I_{c15} = 0.08 \text{ A}$	$THD_{Ic} = 24.3\%$
$I_{n1} = 1.9 \text{ A}$	$I_{n3} = 1.70 \text{ A}$	$I_{n5} = 0.02 \text{ A}$	$I_{n7} = 0 \text{ A}$	$I_{n9} = 0.3 \text{ A}$	$I_{n11} = 0 \text{ A}$	$I_{n13} = 0 \text{ A}$	$I_{n15} = 0.13 \text{ A}$	$THD_{In} = 92.1\%$
$I_a = 3.96 \text{ A}$		$I_b = 2.14 \text{ A}$		$I_c = 2.24 \text{ A}$		$I_n = 2.57 \text{ A}$		
$I_1^+ = 2.66 \text{ A}$			$I_1^{+a} = 2.66 \text{ A}$			$I_1^{+r} = 0.01 \text{ A}$		
$I_1^- = 0.61 \text{ A}$			$I_1^0 = 0.65 \text{ A}$			$I_{U1\#} = 0.89 \text{ A}$		
$I_{aH} = 0.67 \text{ A}$		$I_{bH} = 0.79 \text{ A}$		$I_{cH} = 0.78 \text{ A}$		$I_{nH} = 1.73 \text{ A}$		
$I_{e\#} = 2.85 \text{ A}$		$I_{e1\#} = 2.8 \text{ A}$		$I_{eH\#} = 0.49 \text{ A}$		$THD_{e\#} = 17.62\%$		

Tabla 4-19. Corrientes de red y sus THD_I 's durante la compensación.

Si se comparan la tabla 4-10 (antes de la compensación) y la tabla 4-19 (durante la compensación) se concluye que tras la compensación:

- Las corrientes de red (fases y neutro) fundamentales antes y durante la compensación disminuyen. La corriente I_{a1} se reduce de 4.66 A a 3.9, la corriente I_{b1} se reduce de 3.15 A a 1.99 A, y la corriente I_{c1} se reduce de 3.16 A a 2.1 A. El algoritmo, en este caso, actúa sobre parte de las corrientes fundamentales ineficientes que demanda la carga.
- El THD_{Ia} se reduce de 40.7 % a 12.5 %, el THD_{Ib} se aumenta de 59.3 % a 25.2 %, el THD_{Ic} se reduce de 59.8 % a 24.3 %, el THD_{In} se reduce de 261 % a 92.1 %, y el $THD_{e\#}$ se reduce de 49.18 % a 17.62 %. El THD_{Ib} aumenta porque la reducción de I_{b1} es mayor que la reducción de I_{bH} . El algoritmo reduce las componentes de corriente no fundamentales que demanda la carga.
- Las corrientes armónicas antes y durante la compensación se encuentran equilibradas. Las componentes de corriente armónica que circulan por el neutro disminuyen, además no aparecen otras componentes de corriente diferentes a las que ya existían.

En la tabla 4-20 se encuentran resumidas las principales magnitudes de potencia suministradas por la red tras la compensación.

$S_{e\#} = 1067.81 \text{ VA}$					
$S_{e1\#} = 1051.59 \text{ VA}$			$S_{eN\#} = 185.39 \text{ VA}$		
$S_1^+ = 997.74 \text{ VA}$		$S_{U1\#} = 332.21 \text{ VA}$	$D_{eI\#} = 185.39 \text{ VA}$	$S_{eH\#} = 0 \text{ VA}$	$D_{eV\#} = 0 \text{ VA}$
$P_1^+ = 997.74 \text{ W}$	$Q_1^+ = 0 \text{ var}$				

Tabla 4-20. Magnitudes de potencia suministradas por la red tras la compensación.

Si se comparan la tabla 4-11 (antes de la compensación) y la tabla 4-20 (durante la compensación) se llega a la conclusión de que tras la compensación:

- La red suministra menor cantidad de potencia aparente efectiva ($S_{e\#}$) disminuyendo de 1541.70 VA a 10067.81 VA. El algoritmo reduce las potencias ineficientes en el sistema eléctrico de potencia.
- La potencia aparente efectiva fundamental ($S_{e1\#}$) disminuye de 1383.43 VA a 1051.59 VA. Esto indica que el SAPC suministra a la carga corrientes ineficientes fundamentales.
- La potencia aparente fundamental de secuencia positiva (S_1^+) disminuye de 1342.82 VA a 997.74 VA. P_1^+ , considerada eficiente, no es compensada y permanece prácticamente constante. Debido a que $K_Q=1$, Q_1^+ es compensada totalmente disminuyendo de 894.51 var a 0 var.
- Debido a que $K_U=0$, la potencia de desequilibrio fundamental ($S_{U1\#}$) no es compensada. Su valor permanece prácticamente constante antes y durante la compensación.
- Debido a que $K_H=0.72$, la potencia aparente efectiva no fundamental ($S_{eN\#}$) es parcialmente compensada disminuyendo de 680.41 VA a 185.39 VA.

La función “Posibilidad 2”, combinada con la secuencia S3 de compensación, analizada en esta sección compensa totalmente a Q_1^+ y parcialmente $S_{eN\#}$, mientras que $S_{U1\#}$ no es compensada. Además el SAPC no inyecta componentes armónicas a la red de distribución ni realiza una compensación desequilibrada de las potencias de la carga. Con estos resultados se validan mediante simulación la función “Posibilidad 2”.

4.4.2.3. Función “Posibilidad 3”.

Esta función se ejecuta tras haber comprobado que $I_{z_SAPC_1max} \leq I_{SAPC_MAX}$ y que $I_{z_SAPC_1+2max} \leq I_{SAPC_MAX}$, por lo que en el SAPC dispone de suficiente corriente para suministrar completamente $i_{z_SAPC_1}$, e $i_{z_SAPC_2}$, mientras que $i_{z_SAPC_3}$ sólo puede ser compensada parcialmente. Estas condiciones indican que $K_1=1$, $K_2=1$, y $0 < K_3 < 1$. Esta función básicamente

se centra en encontrar K_3 , su flujograma puede verse en la figura 4-47 y tiene los siguientes pasos:

1. Determinar el instante t_{z_max} donde i_{z_SAPC} se hace máxima (I_{z_SAPC}).
2. Obtener $i_{z_SAPC_1+2}$ e $i_{z_SAPC_3}$ en el instante t_{z_max} ($i_{z_SAPC_1+2}(t_{z_max})$ e $i_{z_SAPC_3}(t_{z_max})$), en el que se cumple la siguiente relación:

$$I_{z_SAPC} = i_{z_SAPC_1+2}(t_{z_max}) + i_{z_SAPC_3}(t_{z_max}) \quad (4.52)$$

3. Sabiendo que existe corriente suficiente para compensar $i_{z_SAPC_1}$ e $i_{z_SAPC_2}$. Calcular la corriente que queda disponible en t_{z_max} para compensar $i_{z_SAPC_3}$ ($i_{z_disponible}(t_{z_max})$). Para esto se utiliza la siguiente expresión.

$$i_{z_disponible}(t_{z_max}) = I_{MAXSAPC} - i_{z_SAPC_1+2}(t_{z_max}) \quad (4.53)$$

4. Se calcula K_{z3} para las tres fases utilizando $i_{z_disponible}(t_{z_max})$ como sigue.

$$K_{z3} = \frac{i_{z_disponible}(t_{z_max})}{i_{z_SAPC_3}(t_{z_max})} \quad (4.54)$$

Con K_{z3} de la anterior ecuación y teniendo en cuenta que $K_{z1}=1$ y $K_{z2}=1$, se garantiza que tras escalar las corrientes de compensación ($i_{z_SAPC_S}$) no se supera a I_{SAPC_MAX} en ningún instante de tiempo.

$$i_{z_SAPC_S} = K_{z1} \cdot i_{z_SAPC_1} + K_{z2} \cdot i_{z_SAPC_2} + K_{z3} \cdot i_{z_SAPC_3} \leq I_{SAPC_MAX} \quad (4.55)$$

5. Se encuentra el valor mínimo entre los tres coeficientes $K_3 = \min(K_{a3}, K_{b3}, K_{c3})$.
6. Los coeficientes que modifican a $i_{z_SAPC_3}$ adoptan el valor mínimo obtenido ($K_{a3}=K_{b3}=K_{c3}=K_3$), mientras que los coeficientes que modifican a $i_{z_SAPC_1}$ e $i_{z_SAPC_2}$ adoptan el valor de 1 ($K_1=K_2=1$).
7. Se retorna al algoritmo principal.

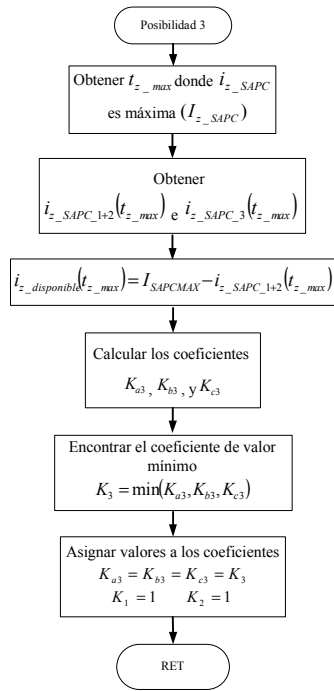


Figura 4-47. Función “Posibilidad 3” utilizado para encontrar los coeficientes de escalado de las corrientes de compensación.

Para comprobar esta función se han realizado simulaciones en Matlab-Simulink. Se tendrá en cuenta la carga el modelo de la figura 4-32. Las formas de onda de la corriente de la carga se muestran en la figura 4-18. En la tabla 4-10, se resumen los valores rms de las componentes armónicas de la carga. En la tabla 4-11, se resumen las magnitudes de potencias de la IEEE Std. 1459-2010 demandadas por la carga.

El SAPC es programado para que trabaje de modo selectivo. La S-function del SAPC es programada para que trabaje con el algoritmo propuesto en esta sección. Se le ha impuesto un límite de 3 A rms ($4.24 A_{pico}$) a las corrientes de compensación del SAPC. Se utilizará la secuencia de compensación de potencia S6 (Q_1^+ , $S_{U1\#}$, $S_{eN\#}$). En el paso 2 del algoritmo principal (Figura 4-30), se obtienen las corrientes de compensación necesarias para suministrarle a la carga las corrientes ineficientes que demanda. Estas corrientes de compensación incluyen los fenómenos de desfase, desequilibrio, distorsión y pueden verse para un periodo completo de la señal fundamental en la figura 4-48.

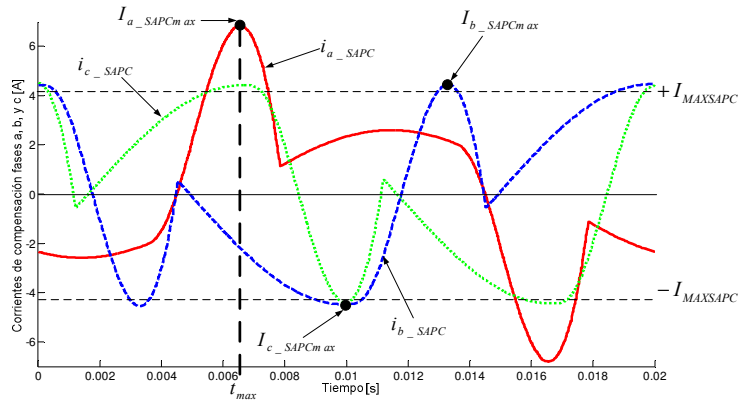


Figura 4-48. Corrientes de compensación sin escalar.

En la figura 4-48 puede verse que las corrientes de compensación de las tres fases superan a $I_{MAXSAPC}$, por lo que, no es posible realizar la compensación total de las corrientes ineficientes de la carga. Si se sigue el algoritmo de la figura 4-30, para este caso, en el paso 4 se descarta la función “Posibilidad 4” o compensación global ($I_z_{SAPC} > I_{SAPC_{MAX}}$). Las funciones “Posibilidad 1”, “Posibilidad 2”, y “Posibilidad 3” que contemplan el escalado de i_{a_SAPC} , i_{b_SAPC} , e i_{c_SAPC} deben ser evaluadas. Para esto se deben encontrar los coeficientes de escalado de las corrientes de compensación (K_H , K_U , y K_Q). Los coeficientes K_H , K_U , y K_Q deben ser constantes para un periodo completo de la señal fundamental y únicos para las tres fases. El criterio para elegir los coeficientes radica en encontrar el coeficiente de valor mínimo entre los coeficientes de las tres fases. Teniendo en cuenta de que el valor máximo de i_{a_SAPC} ($I_{a_SAPC_{max}}$) es mayor que los valores máximos de i_{b_SAPC} , e i_{c_SAPC} ($I_{b_SAPC_{max}}$, e $I_{c_SAPC_{max}}$ respectivamente), los coeficientes de menor valor se presentan en la fase a . En la figura 4-49 se muestran las componentes de corriente de compensación en la fase a que permiten evaluar las funciones “Posibilidad 1”, “Posibilidad 2”, y “Posibilidad 3”.

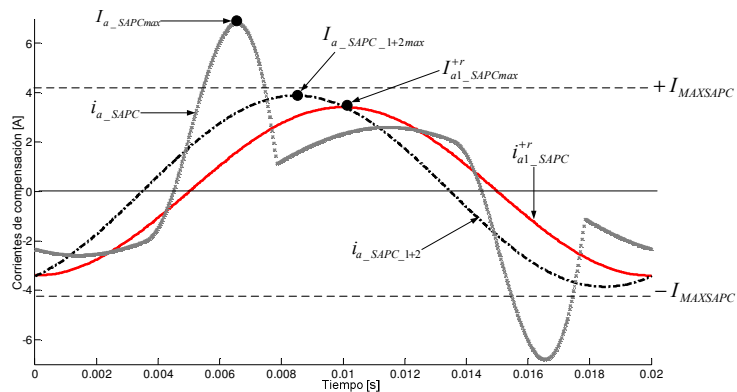


Figura 4-49. Corrientes de compensación fase a (Evaluación de funciones “Posibilidad1”, “Posibilidad2”, y “Posibilidad3”).

De acuerdo a la secuencia de compensación elegida S6 (Q_1^+ , $S_{U1\#}$, $S_{eN\#}$), el algoritmo, en el paso 6, verifica si es capaz de compensar la totalidad de $i_{a1_SAPC}^{+r}$ o no. Para esto, se compara el valor máximo de $i_{a1_SAPC}^{+r}$ ($I_{a1_SAPCmax}^{+r}$) con $I_{MAXSAPC}$. Se cumple que $I_{a1_SAPCmax}^{+r} \leq I_{MAXSAPC}$ y por lo tanto el SAPC es capaz de compensar la totalidad de $i_{a1_SAPC}^{+r}$, con lo que el algoritmo descarta la “Posibilidad 1”. A continuación el algoritmo evalúa si el SAPC es capaz de compensar o no las dos primeras corrientes de la secuencia de compensación. Para esto, el algoritmo obtiene para un periodo completo de la señal fundamental $i_{a_SAPC_1+2}$, que corresponde a la suma de $i_{a1_SAPC}^{+r}$ e i_{U1_SAPC} . En el paso 9, se compara el valor máximo de $i_{a_SAPC_1+2}$ ($I_{a_SAPC_1+2max}$) con $I_{MAXSAPC}$. Se cumple que $I_{a_SAPC_1+2max} \leq I_{MAXSAPC}$, así que el SAPC es capaz de compensar la totalidad de $i_{a1_SAPC}^{+r}$ e i_{U1_SAPC} pero como $I_{a_SAPCmax} > I_{MAXSAPC}$ sólo una parte de i_{aH_SAPC} podrá ser compensada. El algoritmo ejecuta la función “Posibilidad 3”.

En la figura 4-50 se muestran las corrientes de compensación que intervienen en el cálculo de los coeficientes. En la figura 4-51 se realiza un zoom al recuadro para explicar con mayor claridad el algoritmo de la función “Posibilidad 3”.

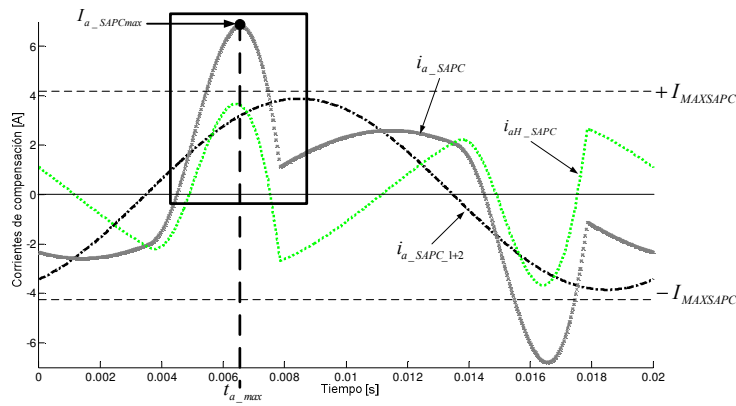


Figura 4-50. Corrientes de compensación que intervienen en el cálculo de los coeficientes de escalado (fase a).

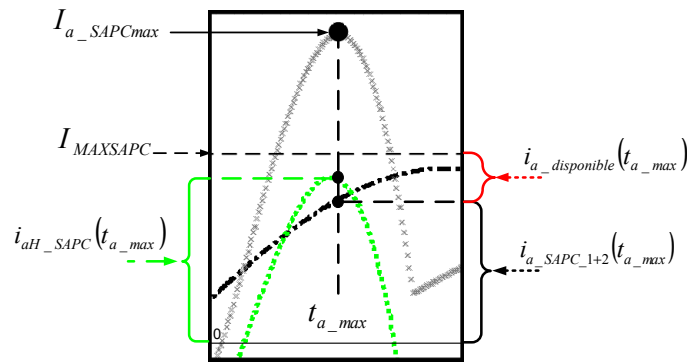


Figura 4-51. Zoom recuadro figura 4-50.

En el instante t_{a_max} se puede ver que existe suficiente corriente para compensar $i_{a1_SAPC}^{+r}$ e i_{U1_SAPC} . La corriente que queda disponible para compensar i_{aH_SAPC} se calcula usando la ecuación (4.56) como sigue:

$$i_{a_disponible}(t_{a_max}) = I_{MAXSAPC} - i_{a_SAPC_1+2}(t_{z_max}) \quad (4.56)$$

Los coeficientes K_Q y K_U para compensar Q_1^+ y $S_{U1\#}$ se les asigna el valor de 1. En este caso, las corrientes $i_{a1_SAPC}^{+r}$ e i_{U1_SAPC} son inyectadas por el SAPC a la carga en su totalidad. El coeficiente K_{aH} es calculado con la ecuación (4.57) como sigue:

$$K_{aH} = \frac{i_{a_disponible}(t_{a_max})}{i_{aH_SAPC}(t_{a_max})} \quad (4.57)$$

El algoritmo también es ejecutado en las fases b y c . Se compararon los coeficientes para las tres fases obteniendo el valor mínimo. Para el caso analizado, los coeficientes de escalado de valor mínimo son $K_Q=1$, $K_U=1$, $K_H=0.26$. Las corrientes de compensación escaladas para la fase a se muestran en la figura 4-52.

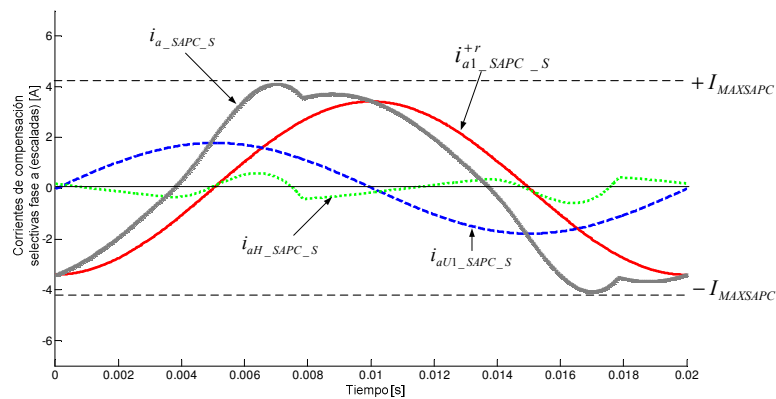


Figura 4-52. Corrientes de compensación selectivas fase a escaladas.

Tras el escalado, las corrientes de compensación $i_{z_SAPC_S}$ no superan a $I_{MAXSAPC}$ en ningún instante de tiempo. En la figura 4-53 puede verse las corrientes de red antes y durante la compensación.

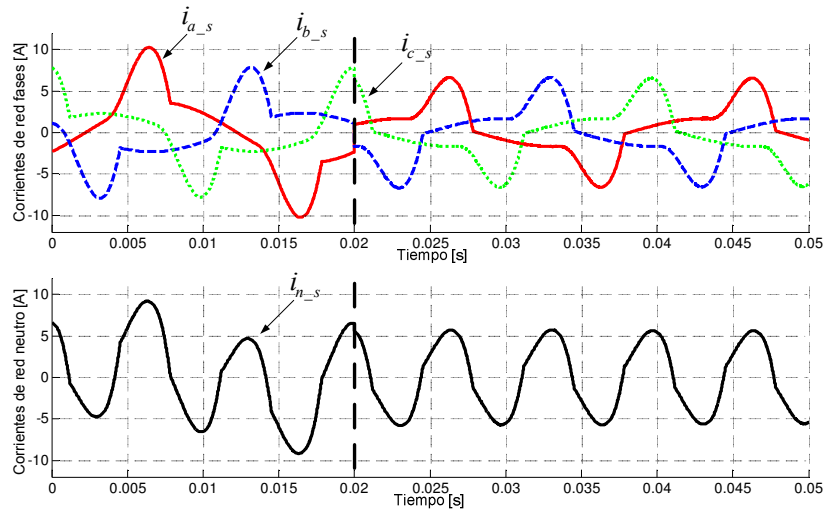


Figura 4-53. Corrientes de red antes y durante la compensación.

Tras la compensación el valor máximo de las corrientes de red (fases y neutro) se reduce considerablemente. En la figura 4-54 se muestra el espectro armónico de las corrientes rms para las fases de la red antes y durante la compensación. En la figura 4-55 se muestra el espectro armónico de la corriente rms para el neutro de la red antes y durante la compensación. En la tabla de 4-21 se muestran los valores rms de las componentes armónicas de las corriente de red (fases y neutro) y sus THD_I 's durante la compensación.

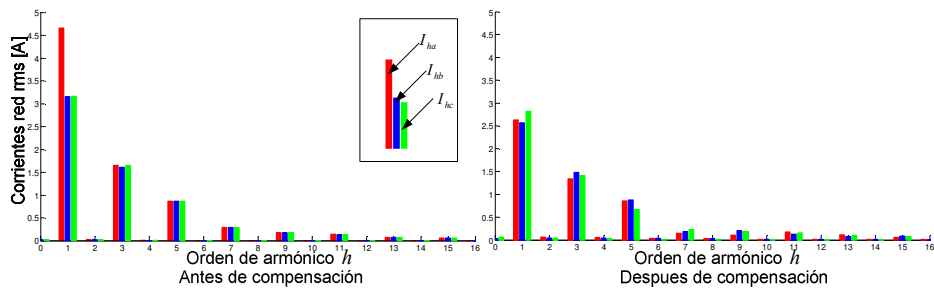


Figura 4-54. Espectros armónicos para las corrientes rms de la red (fases a , b , y c) antes y durante la compensación.

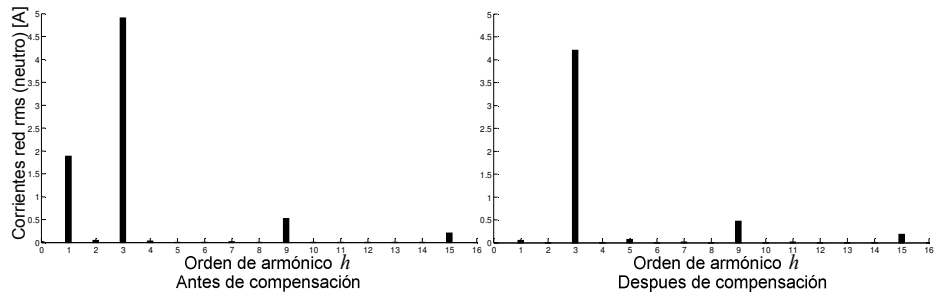


Figura 4-55. Espectros armónicos para la corriente rms de neutro de la red antes y durante la compensación.

$I_{a1} = 2.67 \text{ A}$	$I_{a3} = 1.34 \text{ A}$	$I_{a5} = 0.85 \text{ A}$	$I_{a7} = 0.14 \text{ A}$	$I_{a9} = 0.1 \text{ A}$	$I_{a11} = 0.17 \text{ A}$	$I_{a13} = 0.12 \text{ A}$	$I_{a15} = 0.06 \text{ A}$	$THD_{Ia} = 47.6\%$
$I_{b1} = 2.66 \text{ A}$	$I_{b3} = 1.48 \text{ A}$	$I_{b5} = 0.87 \text{ A}$	$I_{b7} = 0.19 \text{ A}$	$I_{b9} = 0.2 \text{ A}$	$I_{b11} = 0.12 \text{ A}$	$I_{b13} = 0.08 \text{ A}$	$I_{b15} = 0.07 \text{ A}$	$THD_{Ib} = 61.9\%$
$I_{c1} = 2.73 \text{ A}$	$I_{c3} = 1.41 \text{ A}$	$I_{c5} = 0.67 \text{ A}$	$I_{c7} = 0.22 \text{ A}$	$I_{c9} = 0.19 \text{ A}$	$I_{c11} = 0.16 \text{ A}$	$I_{c13} = 0.09 \text{ A}$	$I_{c15} = 0.07 \text{ A}$	$THD_{Ic} = 61.9\%$
$I_{n1} = 0.09 \text{ A}$	$I_{n3} = 4.20 \text{ A}$	$I_{n5} = 0.07 \text{ A}$	$I_{n7} = 0.01 \text{ A}$	$I_{n9} = 0.47 \text{ A}$	$I_{n11} = 0.01 \text{ A}$	$I_{n13} = 0 \text{ A}$	$I_{n15} = 0.18 \text{ A}$	$THD_{In} = \dots\%$
$I_a = 3.12 \text{ A}$		$I_b = 3.18 \text{ A}$		$I_c = 3.16 \text{ A}$		$I_n = 4.23 \text{ A}$		
$I_1^+ = 2.68 \text{ A}$			$I_1^{+a} = 2.68 \text{ A}$			$I_1^{+r} = 0.01 \text{ A}$		
$I_1^- = 0.02 \text{ A}$			$I_1^0 = 0.02 \text{ A}$			$I_{U1\#} = 0.03 \text{ A}$		
$I_{aH} = 1.61 \text{ A}$		$I_{bH} = 1.75 \text{ A}$		$I_{cH} = 1.6 \text{ A}$		$I_{nH} = 4.23 \text{ A}$		
$I_{e\#} = 3.01 \text{ A}$		$I_{e1\#} = 2.69 \text{ A}$		$I_{eH\#} = 1.35 \text{ A}$		$THD_{eH\#} = 50.26\%$		

Tabla 4-21. Corrientes de red y sus THD_I 's durante la compensación.

Si se comparan la tabla 4-10 (antes de la compensación) y la tabla 4-21 (durante la compensación) se concluye que tras la compensación sucede lo siguiente:

- Las corrientes de red (fases y neutro) fundamentales antes y durante la compensación disminuyen siendo casi equilibradas. La corriente I_{a1} se reduce de 4.66 A a 2.67, la corriente I_{b1} se reduce de 3.15 A a 2.66 A, y la corriente I_{c1} se reduce de 3.16 A a 2.73 A. El algoritmo, en este caso, actúa sobre las corrientes fundamentales ineficientes que demanda la carga (desfase y desequilibrio fundamental).
- En términos generales la distorsión armónica de corriente aumenta. El THD_{Ia} se aumenta de 40.7 % a 47.6 %, el THD_{Ib} se aumenta de 59.3 % a 61.9 %, el THD_{Ic} se aumenta de 59.8 % a 61.9 %, el THD_{In} se aumenta de 261 % a 1057.5 %, y el $THD_{eH\#}$ se aumenta de 49.18 % a 50.26 %. Los THD_I 's aumentan debido a que el porcentaje de compensación de corrientes ineficientes fundamentales es muy alto con respecto al porcentaje de compensación de corrientes no fundamentales (se mantiene la i_h y se reduce la i_1).
- Las corrientes fundamentales que circulan por el neutro son prácticamente compensadas. Las componentes de corriente armónica que circulan por el neutro disminuyen levemente, además no aparecen otras componentes de corriente diferentes a las que ya existían.

En la tabla 4-22 se encuentran resumidas las principales magnitudes de potencia suministradas por la red tras la compensación.

$S_{e\#} = 1127.92 \text{ VA}$					
$S_{e1\#} = 1007.81 \text{ VA}$		$S_{eN\#} = 506.49 \text{ VA}$			
$S_1^+ = 1008.99 \text{ VA}$		$S_{U1\#} = 0 \text{ VA}$	$D_{e1\#} = 506.49 \text{ VA}$	$S_{eH\#} = 0 \text{ VA}$	$D_{eV\#} = 0 \text{ VA}$
$P_1^+ = 1008.99 \text{ W}$	$Q_1^+ = 0 \text{ var}$				

Tabla 4-22. Magnitudes de potencia suministradas por la red tras la compensación.

Si se comparan la tabla 4-11 (antes de la compensación) y la tabla 4-22 (durante la compensación) se llega a que tras la compensación sucede lo siguiente:

- La red suministra menor cantidad de potencia aparente efectiva ($S_{e\#}$) disminuyendo de 1541.70 VA a 1127.92 VA. El algoritmo reduce las potencias ineficientes en el sistema eléctrico de potencia.
- La potencia aparente efectiva fundamental ($S_{e1\#}$) disminuye de 1383.43 VA a 1007.81 VA estando formada principalmente por P_1^+ . Esto indica que el SAPC suministra a la carga corrientes ineficientes fundamentales.
- La potencia aparente fundamental de secuencia positiva (S_1^+) disminuye de 1342.82 VA a 1008.99 VA. Debido a que $K_Q=1$, Q_1^+ es compensada totalmente disminuyendo de 894.51 var a 0.53 var. Debido a que $K_U=1$, la potencia de desequilibrio fundamental ($S_{U1\#}$) es compensada totalmente disminuyendo de 337.73 VA a 0 VA. S_1^+ , en este caso, sólo está compuesta por P_1^+ la cual es considerada eficiente y permanece prácticamente constante antes y durante la compensación.
- Debido a que $K_H=0.26$, la potencia aparente efectiva no fundamental ($S_{eN\#}$) es parcialmente compensada disminuyendo de 680.41 VA a 506.49 VA.

La función “Posibilidad 3”, combinada con la secuencia S6 de compensación, analizada en esta sección compensa totalmente a Q_1^+ y $S_{U1\#}$, y compensa parcialmente $S_{eN\#}$. Además, el SAPC no inyecta componentes armónicas a la red de distribución ni realiza una compensación desequilibrada de las potencias de la carga. Con estos resultados se validan mediante simulación la función “Posibilidad 3”.

4.4.2.4. Función “Posibilidad 4”. Estrategia de compensación G_T .

Este caso corresponde al caso óptimo en el que todas las potencias ineficientes son compensadas. Será llamado estrategia de compensación global total o estrategia de compensación G_T para distinguirlas entre las demas. Para que esta función se ejecute se requiere que en todas las fases se verifique ($i_{z_SAPCmax} \leq I_{SAPCmax}$), por lo que, el SAPC es capaz de suministrar toda la corriente necesaria para compensar todas las potencias ineficientes de la carga aprovechándose al máximo la potencia que es capaz de suministrar el SAPC. En teoría,

tras la compensación, el sistema eléctrico de potencia sólo suministra componentes de corriente activas y fundamentales de secuencia positiva. Con la función “Posibilidad 4” no se realiza el escalado de las corrientes de compensación, si no que se le asigna el valor de 1 a todos los coeficientes de las corrientes de compensación ($K_1=K_2=K_3=1$). La validación de esta función se realizará en el capítulo 6 donde se presentan los resultados de simulación de la tesis.

4.5. Conclusiones.

El SAPC es un dispositivo que actúa como fuente de corriente controlada y sirve para inyectar en el pcc las corrientes ineficientes que demanda la carga evitando que las potencias ineficientes fluyan por el sistema eléctrico de distribución. Con el uso del SAPC se pueden reducir las pérdidas de potencia y los efectos nocivos que las potencias ineficientes provocan en los elementos que componen el sistema eléctrico.

Las corrientes de compensación planteadas en (4.5) y (4.6) sirven para realizar la reducción de las potencias ineficientes que la carga demanda. Sin embargo, cuando la potencia ineficiente que demanda la carga (S_{inef_load}) es mayor que la potencia nominal del SAPC (S_{SAPC}), hay que realizar el escalado de las corrientes de compensación. Los algoritmos para el escalado de las corrientes de compensación contemplan las estrategias de compensación global y selectiva.

Para elegir los coeficientes de escalado de las corrientes de compensación hay que tener en cuenta estas dos consideraciones:

- Elegir un coeficiente constante para un periodo completo de la señal fundamental. Con esto se garantiza que el SAPC no inyecta componentes de corriente armónica diferentes a las que demanda la carga.
- Elegir un coeficiente de igual valor para las tres fases. Con esto se garantiza que el SAPC no realiza una compensación desequilibrada de las corrientes de la carga.

La compensación selectiva se obtiene mediante funciones que de acuerdo a la capacidad del SAPC y a la secuencia de compensación elegida compensan unas determinadas corrientes ineficientes de la carga. Mediante simulación se han validado las siguientes funciones:

- Función “Posibilidad 1”: esta función sirve para compensar parcialmente la primera potencia ineficiente de la carga según la secuencia de compensación elegida.
- Función “Posibilidad 2”: esta función sirve para compensar la totalidad de la primera potencia ineficiente de la carga, y parcialmente la segunda potencia ineficiente de la carga según la secuencia de compensación elegida.
- Función “Posibilidad 3”: esta función sirve para compensar la totalidad de la primera y segunda potencias ineficientes de la carga, y parcialmente la tercera potencia ineficiente de la carga según la secuencia de compensación elegida.

También se ha planteado las corrientes de compensación para la reducción de las corrientes del neutro (Estrategia de compensación N). Con ayuda de la ecuación (4.33), se puede elegir compensar las corrientes fundamentales de la carga que circulan por el neutro o las corrientes armónicas demandadas por la carga que circulan por el neutro. Con la ecuación (4.33) también se puede realizar una compensación combinada de las diferentes corrientes que circulan por el neutro. Los algoritmos para elegir los coeficientes para la estrategia de compensación N son similares a los algoritmos “Posibilidad 1” y “Posibilidad 2”.

Se resaltan las siguientes estrategias de compensación como apropiadas porque no provocan distorsión, desequilibrios o problemas que antes no existían:

- Estrategia de compensación global sin limitación de potencia o estrategia de compensación G_T .
- Estrategia de compensación global con limitación de potencia o estrategia de compensación G_L .
- Estrategias de compensación selectiva con sus secuencias S1, S2, S3, S4, S5, y S6.
- Estrategia de compensación para la reducción de las corrientes del neutro o estrategia de compensación N.

5. Criterios para la compensación selectiva de las potencias ineficientes de la carga.

La compensación selectiva se requiere solamente cuando la potencia disponible en el SAPC es menor al conjunto de potencias ineficientes demandadas por la carga. Aún no se ha encontrado en la bibliografía técnica un criterio con base científica para determinar, en este supuesto, que ineficiencias deben tener prioridad en la compensación selectiva. Es difícil, por no decir imposible, que se pueda plantear un único criterio para la elección de la secuencia de compensación de las potencias ineficientes, ya que la elección de una u otra secuencia de compensación está fuertemente ligada al estado de la red de suministro, la cual está continuamente cambiando por todos los agentes que actúan sobre la misma: consumos, operadores de red, condiciones atmosféricas, etc.

En [92], los autores adoptan un criterio para la compensación selectiva de las potencias ineficientes de la carga por el cual se compensan primero las corrientes armónicas, y en segundo lugar, de acuerdo a los intereses de las empresas de energía y los usuarios finales, se compensan o bien las corrientes desequilibradas o bien las corrientes reactivas. A pesar de que en [92] se establece un criterio para la elección de la secuencia de compensación de potencia ineficiente, allí no se establecen razones ni motivos por los cuales es elegida dicha secuencia.

En la IEEE Std. 519-1992 [99] sólo se establecen criterios para la compensación selectiva de las corrientes no fundamentales de la carga, basándose en los efectos o pérdidas que cada corriente no fundamental puede provocar. En la IEEE Std. 519-1992 se establecen los límites para la distorsión armónica de corriente y los límites para cada corriente individual. Los límites de distorsión armónica para cada armónico son establecidos de acuerdo a los daños o gravedad de cada armónico en los sistemas eléctricos.

Los criterios analizados en este capítulo no se encuentran ordenados en orden de prioridad y dependen básicamente de los intereses que se tengan. A continuación se establecen siete criterios con los cuales se pretende determinar la mejor secuencia en la compensación selectiva de las potencias ineficientes que demanda la carga.

1. Maximizar la potencia entregada por el SAPC a la carga
2. Mejorar la calidad de la potencia de los sistemas eléctricos.
3. Contribuir a la estabilidad de los sistemas eléctricos.
4. Minimizar el costo de la factura eléctrica.

5. Minimizar las pérdidas de potencia en el sistema eléctrico de distribución.
6. Evitar superar el límite térmico de los conductores de alimentación.
7. Reducir la corriente del neutro.

5.1. Criterio 1: Maximizar la potencia entregada por el SAPC a la carga.

El SAPC es un dispositivo electrónico que es usado para suministrar las potencias ineficientes que demanda la carga, por lo que maximizar la potencia entregada por el SAPC a la carga implica una mayor reducción de las potencias ineficientes en la red eléctrica. Como criterio se establece:

La secuencia de compensación que maximice la potencia entregada por el SAPC a la carga aprovechando mejor su potencia disponible.

Para el correcto funcionamiento del SAPC, la potencia aparente máxima del SAPC (S_{SAPC_max}) debe coincidir con su potencia aparente nominal (S_{SAPC_nom}). S_{SAPC_nom} está en función de la tensión nominal (V_{SAPC_nom}) y la corriente nominal (I_{SAPC_nom}) que puede inyectar por las fases activas ($a, b, y c$).

$$S_{SAPC_max} = S_{SAPC_nom} = 3V_{SAPC_nom} I_{SAPC_nom} \quad (5.1)$$

Para poder maximizar la potencia que el SAPC entrega a la carga primero hay que cuantificar adecuadamente dicha potencia. Para esto se propone el uso de las nuevas expresiones para $V_{e\#}$, $I_{e\#}$, y $S_{e\#}$ propuestas en la sección 1.2.3.4 del capítulo 1. Con el fin de ratificar, con un ejemplo teórico, el uso de las nuevas expresiones propuestas en el dimensionamiento de potencia de los SAPC's, a continuación se realizará un análisis con el que se compara la cuantificación de potencia del SAPC usando las expresiones propuestas en la IEEE Std. 1459-2010 (V_e , I_e , y S_e) y usando las expresiones propuestas en la tesis ($V_{e\#}$, $I_{e\#}$, y $S_{e\#}$), para esto se utilizará el sistema eléctrico de la figura 5-1.

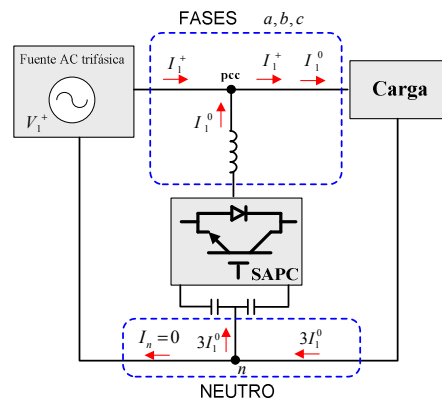


Figura 5-1. Sistema eléctrico bajo análisis.

En la figura 5-1 la fuente suministra a la carga un sistema de tensiones simétrico fundamental de secuencia positiva (V_1^+). La carga se encuentra desequilibrada y en este caso demanda corriente fundamental de secuencia positiva (I_1^+) y corriente fundamental de secuencia cero (I_1^0). Cuando una carga es desequilibrada generalmente demanda de la red las componentes de corriente I_1^+ , I_1^0 , e I_1^- , pero sin embargo, en este caso no se incluye a I_1^- para facilitar el análisis aunque resultados similares pueden ser obtenidos si I_1^- es incluida. Si no se supera S_{SAPC_max} , el SAPC por cada fase activa (a , b , y c) debe inyectar I_1^0 y por el neutro debe retornar $3I_1^0$. Tras el uso del SAPC por el sistema eléctrico no deben circular componentes de corriente fundamental de secuencia cero. Teniendo en cuenta las tres fases activas del SAPC ($a, b, y c$) y que el SAPC está conectado en el pcc a una tensión V_1^+ , la potencia aparente que suministra el SAPC (S_{SAPC}) es:

$$S_{SAPC} = 3V_1^+ I_1^0 \quad (5.2)$$

Durante la compensación, en las salidas a , b , y c del SAPC circulan corrientes con valor rms igual a I_1^0 , mientras que por el neutro del propio SAPC circula una corriente con valor rms igual a $3I_1^0$. Usando las ecuaciones (1.54), y (1.55) de la IEEE Std. 1459-2010, el cálculo de las expresiones de voltaje efectivo (V_{e_SAPC}) y corriente efectiva (I_{e_SAPC}) en el SAPC son:

$$V_{e_SAPC} = \sqrt{\frac{1}{18}(V_a^2 + V_b^2 + V_c^2 + V_{ab}^2 + V_{bc}^2 + V_{ca}^2)} = \sqrt{(V_1^+)^2} = V_1^+ \quad (5.3)$$

$$I_{e_SAPC} = \sqrt{\frac{1}{3}(I_a^2 + I_b^2 + I_c^2 + I_n^2)} = \sqrt{4(I_1^0)^2} = 2I_1^0 \quad (5.4)$$

La potencia aparente efectiva en el SAPC (S_{e_SAPC}) está dada por:

$$S_{e_SAPC} = 3 \cdot V_{e_SAPC} \cdot I_{e_SAPC} = 2(3V_1^+ I_1^0) \quad (5.5)$$

Si se calcula el voltaje efectivo ($V_{e\#_SAPC}$) y la corriente efectiva ($I_{e\#_SAPC}$) con las expresiones propuestas en la tesis, se tiene:

$$V_{e\#_SAPC} = \sqrt{\frac{1}{3}(V_a^2 + V_b^2 + V_c^2)} = \sqrt{(V_1^+)^2} = V_1^+ \quad (5.6)$$

$$I_{e\#_SAPC} = \sqrt{\frac{1}{3}(I_a^2 + I_b^2 + I_c^2)} = \sqrt{(I_1^0)^2} = I_1^0 \quad (5.7)$$

La potencia aparente efectiva propuesta en el SAPC ($S_{e\#_SAPC}$) está dada por:

$$S_{e\#_SAPC} = 3 \cdot V_{e\#_SAPC} \cdot I_{e\#_SAPC} = 3V_1^+ I_1^0 \quad (5.8)$$

La potencia $S_{e\#_SAPC}$ coincide con S_{SAPC} , mientras que S_{e_SAPC} es el doble de S_{SAPC} . Si se utilizan las expresiones definidas en la IEEE Std. 1459-2010 se comete un error de cálculo de potencia en el SAPC. Con esto se ratifica que para dimensionar correctamente los diferentes elementos de los sistemas eléctricos, y en especial los SAPC's, las expresiones que deben ser usadas son

$V_{e\#}$, $I_{e\#}$, y $S_{e\#}$. Con las expresiones de V_e , I_e , y S_e se comete un error de sobrevaloración de potencia.

El SAPC es un dispositivo que sirve para inyectar las corrientes ineficientes de la carga, por lo que es usado para reducir en la red las potencias Q_1^+ , $S_{U1\#}$, y $S_{eN\#}$ demandadas por la carga. Para cuantificar las potencias ineficientes que demanda la carga se utiliza a S_{inef_load} definido previamente en la ecuación (4.28):

$$S_{inef_load} = \sqrt{(Q_1^+)^2 + (S_{U1\#})^2 + (S_{eN\#})^2} \quad (5.9)$$

Para una compensación completa y de máxima eficiencia S_{inef_load} debe coincidir con la potencia aparente máxima que es capaz de suministra el SAPC (S_{SAPC_max}) proporcionando a la carga las potencias ineficientes y eliminándolas de la red de suministro. El máximo aprovechamiento de la potencia disponible en el SAPC ocurre cuando su potencia aparente máxima (S_{SAPC_max}) es igual a la potencia aparente que el SAPC suministra a la carga ($S_{e\#_SAPC}$). Con el objetivo de comparar a S_{SAPC_max} con $S_{e\#_SAPC}$ se define un nuevo factor, el factor de uso del SAPC (UF):

$$UF = \frac{S_{e\#_SAPC}}{S_{SAPC_max}} \quad (5.10)$$

El factor UF puede variar entre 0 y 1. Valores bajos de UF indican que el SAPC inyecta poca potencia ineficiente a la carga y no se aprovecha la potencia disponible en el SAPC. Las razones por las cuales UF puede tomar valores bajos son:

- La carga demanda una cantidad de potencia ineficiente menor que la potencia disponible en el SAPC ($S_{inef_load} < S_{SAPC_max}$) y el SAPC es capaz de inyectar toda la potencia ineficiente que demanda la carga ($S_{e\#_SAPC} = S_{inef_load}$). En este caso se realiza la compensación global de las potencias ineficientes de la carga y aún queda potencia disponible en el SAPC que no es utilizada.
- La carga demanda una cantidad de potencia ineficiente mayor que la potencia disponible en el SAPC ($S_{inef_load} > S_{SAPC_max}$) y el SAPC debe entrar en modo selectivo suministrando parte de la potencia ineficiente que demanda la carga. Dependiendo de la estrategia de compensación selectiva utilizada puede ocurrir que no se aproveche al máximo la potencia aparente disponible en el SAPC y se cumpla ($S_{SAPC_max} >> S_{e\#_SAPC}$).

Si UF tiende a “1” indica que el SAPC inyecta la mayoría de la potencia que tiene disponible a la carga y que la capacidad del SAPC se está aprovechando casi en su totalidad ($S_{SAPC_max} \approx S_{e\#_SAPC}$).

En el caso de que UF sea mayor que 1, indica que ($S_{e\#_SAPC} > S_{SAPC_max}$) por lo que en el SAPC se ha producido un error y se debe desconectar.

En el capítulo anterior se desarrollaron algoritmos que sirven para inyectar potencia a la carga de forma selectiva cuando existe limitación de potencia en el SAPC, por lo que es posible compensar las potencias ineficientes de la carga (Q_1^+ , $S_{U1\#}$, y $S_{eN\#}$) en cualquier secuencia. Cuando la potencia ineficiente demandada por la carga es mayor que la potencia disponible en el compensador ($S_{inef_SAPC} > S_{SAPC_max}$), es necesario establecer la secuencia de compensación que mejor aproveche la potencia disponible en el SAPC aumentando el factor de uso UF .

5.2. Criterio 2: Mejorar la calidad de la potencia de los sistemas eléctricos.

La definición del término “calidad de la potencia” aún no tiene un consenso universal y depende de los intereses que se tengan. Las empresas distribuidoras de energía suelen definir el término de la calidad de la potencia en función de la confiabilidad, dentro de este contexto cualquier evento o fenómeno que ocasione la interrupción del suministro o que provoque la inestabilidad del sistema eléctrico es sinónimo de deterioro de la calidad de la potencia. Las empresas distribuidoras de energía, debido a sus intereses, enfocan el concepto de calidad de la potencia en fenómenos naturales impredecibles y en los eventos que los usuarios finales pueden ocasionar. En otro contexto, los usuarios finales de la energía definen el concepto de calidad de la potencia como las características que debe tener la tensión de la fuente de energía eléctrica para que sus equipos funcionen apropiadamente. Los usuarios finales de la energía, enfocándose también en sus intereses, igualan al concepto de calidad de la potencia con el concepto de la calidad del voltaje. Para cualquier usuario final, que la empresa de energía le suministre un sistema de tensiones trifásico simétrico de frecuencia fundamental (V_1^+), es sinónimo de buena calidad de la potencia.

Las empresas distribuidoras de energía atribuyen a los usuarios finales el deterioro de la calidad de la potencia y viceversa. Mantener una forma de onda tensión senoidal y simétrica de frecuencia fundamental es responsabilidad de las empresas distribuidoras de energía, por lo que el malfuncionamiento de cualquier elemento del sistema eléctrico podría ocasionar su deterioro. Los usuarios finales de la energía con sus maniobras o sus cargas conectadas también pueden ocasionar problemas operativos e inclusive pueden causar la interrupción del suministro. Realmente tanto las empresas distribuidoras de energía como los usuarios finales tienen responsabilidad en mantener altos estándares de calidad de la potencia. Para lograr esto es necesario redefinir el concepto de calidad de la potencia con objetividad. En esta tesis se amplía el concepto de calidad de la potencia enunciando:

Un sistema eléctrico funciona correctamente con el estándar más alto de calidad de la potencia cuando la carga con valores de corrientes y tensiones apropiados demanda y recibe únicamente, de forma permanente y sin interrupciones, un valor constante de P_1^+ .

Cualquier evento o fenómeno que modifique el enunciado anterior contribuye al deterioro de la calidad de la potencia. En realidad, alcanzar el estándar más alto con las condiciones del enunciado es una situación ideal aunque es a lo que pretende llegar.

La frase “*valores de corriente y tensiones apropiados*” se refiere a corrientes y tensiones de operación muy cercanos a los valores nominales que no ocasionen la disminución de la vida útil de ningún elemento conectado o que no ocasionen fallos y malfuncionamiento en algún punto del sistema. Valores inapropiados de corriente pueden ser causados por sobrecargas o por cortocircuitos, mientras que valores inapropiados de tensión son causados por múltiples razones (conexión y desconexión de grandes cargas, descargas atmosféricas, maniobras en la red de suministro, etc) y hace referencia a cualquier alteración del valor rms o de la forma de onda de la tensión.

La frase del enunciado “*de forma permanente y sin interrupciones*” se refiere a un sistema eléctrico que no presente interrupciones en el que no se ocasione pérdidas de producción y capital. La frase también se refiere a que en el sistema eléctrico no existan huecos de tensión o cualquier fenómeno transitorio.

La frase del enunciado “*un valor constante de P_1^+* ” se refiere a que las cargas sólo demanden potencia eficiente y que sea constante indica que no existan variaciones bruscas de carga reduciendo problemas de inestabilidad. La demanda de P_1^+ también implica que las ondas de tensión sean senoidales y simétricas de frecuencia fundamental (V_1^+) y que las formas de onda de corriente sean senoidales, fundamentales, equilibradas, y en fase con V_1^+ (I_1^{+a}). De esta forma las únicas pérdidas serán las propias de la demanda de P_1^+ en los conductores, transformadores, y demás elementos del sistema eléctrico de distribución, siendo estas las mínimas alcanzables.

El SAPC es un elemento que sirve para solucionar algunos problemas relacionados con la calidad de la potencia. Con el SAPC es posible reducir la potencia ineficiente que suministra la red a la carga evitando pérdidas y otros efectos en los sistemas de distribución. Debido a que el SAPC actúa como una fuente de corriente controlada es posible solucionar los problemas referentes a la demanda de corrientes ineficientes. En un sistema con tensiones trifásicas, senoidales, y simétricas de frecuencia fundamental (V_1^+), el SAPC puede reducir la potencia suministrada por la red a la carga al valor mínimo P_1^+ .

Como ya ha sido expuesto, cuando el SAPC no es capaz de compensar toda la potencia ineficiente demandada por la carga, sólo una parte o porción del conjunto conformado por Q_1^+ , $S_{U1\#}$, y $S_{eN\#}$ puede ser compensado. Sabiendo que Q_1^+ , $S_{U1\#}$, y $S_{eN\#}$ pueden ser compensadas de forma selectiva, se puede evaluar cual de las estrategias de compensación (S1, S2, S3, S4, S5, S6, y G) contribuye más con la mejora de la calidad de la potencia. Como criterio se establece:

La secuencia de compensación que minimice más la potencia suministrada por la red de suministro a la carga, mejorando la calidad de la potencia de los sistemas eléctricos, medida dicha calidad con los factores de mérito más adecuados.

En la IEEE Std. 1459-2010 están definidas algunas expresiones para evaluar determinados aspectos de la calidad de la potencia. Para evaluar la demanda de potencia reactiva tradicionalmente se han utilizado los términos correspondientes a los factores de potencia (P_F , P_{F1} , y P_{F1}^+), mientras que para evaluar la distorsión armónica de las formas de onda tradicionalmente se han utilizado los términos correspondientes a los *THD's* (THD_I , y THD_V). Tanto los factores de potencia P_F , P_{F1} , y P_{F1}^+ como los términos THD_I , y THD_V son incluidos en la mayoría de los analizadores de redes comerciales para evaluar la calidad de la potencia, a continuación se realizará una breve discusión acerca de lo que representa cada uno de estos términos teniendo en cuenta la definición de calidad de la potencia enunciada en esta tesis.

El factor de potencia P_F : el factor P_F es la relación entre la potencia activa (P) y la potencia aparente efectiva (S_e) ($P_F=P/S_e$), ecuación (1.77). La potencia P contiene todas las potencias activas que recibe la carga (P_1^+ , P_1^- , P_1^0 , y P_H), mientras que S_e contiene todas las potencias eficiente e ineficientes demandadas por la carga. La potencia activa P_1^+ es la única potencia considerada eficiente, mientras que las potencias activas P_1^- , P_1^0 , y P_H son disipadas en la carga pero son producto del funcionamiento ineficiente de los sistemas eléctricos. Las potencias activas P_1^- , P_1^0 se deben a la asimetría de la tensión de suministro y al desequilibrio de las corrientes de la carga, mientras que la potencia P_H se debe a la existencia de corrientes y voltajes distorsionados de la misma frecuencia. P_1^- , P_1^0 , y P_H pueden ser compensadas con el SAPC ya que dependen de las corrientes ineficientes de la carga. Tanto P como S_e están conformados por términos de potencia eficiente e ineficientes por lo que el factor P_F no es el más adecuado para evaluar la calidad de la potencia. El factor P_F sólo sirve para evaluar la proporción de potencia activa respecto a la potencia aparente consumida por la carga.

El factor de potencia fundamental P_{F1} : el factor P_{F1} es la relación entre la potencia activa fundamental (P_1) y la potencia aparente efectiva fundamental (S_{e1}) ($P_{F1}=P_1/S_{e1}$), ecuación (1.12). La potencia P_1 contiene a todas las potencias activas fundamentales (P_1^+ , P_1^- , y P_1^0), con P_1^+ considerada eficiente y con P_1^- , y P_1^0 consideradas ineficientes. S_{e1} contiene todas las potencias que cuantifican los fenómenos de frecuencia fundamental (P_1^+ , Q_1^+ , S_{U1}). El factor P_{F1} no es el más adecuado para evaluar la calidad de la potencia porque no contempla el fenómeno de la distorsión, y además compara a P_1 , que contiene a potencias activas eficiente e ineficientes fundamentales, con S_{e1} que contiene todas las potencias eficientes e ineficientes fundamentales. Este factor sólo es útil para evaluar la proporción de potencia aparente fundamental demandada respecto a la potencia activa fundamental consumida por la carga.

El factor de potencia fundamental de secuencia positiva P_{F1}^+ : el factor P_{F1}^+ es la relación entre la potencia activa fundamental de secuencia positiva (P_1^+) y la potencia aparente fundamental de secuencia positiva (S_1^+) ($P_{F1}^+=P_1^+/S_1^+$), ecuación (1.51). Se compara P_1^+ considerada eficiente con S_1^+ que está compuesta por P_1^+ y Q_1^+ . El factor P_{F1}^+ sirve para determinar la calidad de la potencia cuando sólo existe P_1^+ y Q_1^+ . El factor P_{F1}^+ no es el más adecuado para valorar la calidad de la potencia cuando existen los fenómenos de desequilibrio y de distorsión.

La distorsión armónica total equivalente de corriente (THD_{el}): En la IEEE Std 1459-2010, el término THD_{el} es la relación entre la corriente efectiva no fundamental (I_{eH}) y la corriente efectiva fundamental (I_{e1}) ($THD_{el}=I_{eH}/I_{e1}$), ecuación (1.79). Con este término se logra evaluar el grado de distorsión de las ondas de corriente que circulan por los conductores de alimentación. La corriente I_{e1} contiene a I_1^{+a} , I_1^{+r} , I_1^0 , e I_1^- , mientras que I_{eH} contiene todas las corrientes no fundamentales. La corriente I_1^{+a} es la única corriente demandada por la carga considerada eficiente y está asociada a P_1^+ . La corriente I_1^{+r} se debe al fenómeno de desfase, y las corrientes I_1^0 , e I_1^- se deben al desequilibrio de las corrientes de la carga. Si el THD_{el} tiende a 0 se puede afirmar que las corrientes que circulan por los conductores son prácticamente sinusoidales y no están distorsionadas. Cuanto mayor es el THD_{el} mayor es la distorsión de las ondas de corriente.

El estudio del THD_{el} revela una ambigüedad que puede explicarse con el análisis de la situación descrita a continuación: se supone una carga que demanda de la red las corrientes I_1^+ , I_1^0 , I_1^- , e I_{eH} . De acuerdo a las ecuaciones (1.55) y (1.79) el THD_{el} de la carga, que se distinguirá con el nombre (THD_{el_carga}), está dado por:

$$THD_{el_carga} = \frac{I_{eH}}{\sqrt{(I_1^+)^2 + (I_1^-)^2 + 4(I_1^0)^2}} = \frac{I_{eH}}{I_{e1}} \quad (5.11)$$

Si con un SAPC selectivo se decide eliminar de la red I_1^0 , e I_1^- pero no I_{eH} , se obtiene en la red el nuevo THD_{el} durante la compensación (THD_{el_red}) como sigue:

$$THD_{el_red} = \frac{I_{eH}}{\sqrt{(I_1^+)^2}} = \frac{I_{eH}}{I_1^+} \quad (5.12)$$

Tras la compensación de I_1^0 , e I_1^- en el sistema eléctrico, el denominador de la ecuación (5.12) es menor que el denominador de la ecuación (5.11), por lo que el THD_{el} aumenta ($THD_{el_carga} < THD_{el_red}$). La interpretación clásica del aumento del THD_{el} es que las formas de onda de corriente están más distorsionadas. Esto conlleva a que la compensación de I_1^0 , e I_1^- aparentemente provoca que las ondas de corriente se encuentren más distorsionadas. Bajo esta premisa para evitar el aumento del THD_{el} , las corrientes I_1^0 e I_1^- no deberían ser compensadas. Indudablemente tras la compensación de I_1^0 e I_1^- hay un mejoramiento de la calidad de la

potencia en el sistema eléctrico, el término de THD_{el} no debería aumentar y no debería depender de las corrientes fundamentales ineficientes. Tras el análisis realizado, el THD_{el} (que ya fue mejorado en el capítulo 1 (Ec. 1.148) es mejorado nuevamente y se propone utilizar la siguiente expresión:

$$THD_{el*} = \frac{I_{eH\#}}{I_1^{+a}} \quad (5.13)$$

Similarmente se proponen nuevos THD_I 's por fase ($z=a,b,c,n$) con la siguiente expresión:

$$THD_{Iz*} = \frac{I_{zH}}{I_1^{+a}} \quad (5.14)$$

Los nuevos THD_I 's propuestos no dependen de I_1^{+r} , I_1^0 , e I_1^- siendo de esta forma indicadores más adecuados para la evaluación de la distorsión armónica de corriente.

La distorsión armónica total equivalente de voltaje (THD_{eV}): En la IEEE Std. 1459-2010, el término THD_{eV} es la relación entre el voltaje efectivo no fundamental (V_{eH}) y el voltaje efectivo fundamental (V_{e1}) ($THD_{eV}=V_{eH}/V_{e1}$), ecuación (1.78). Con este término se logra evaluar el grado de distorsión de las ondas de voltaje. El voltaje V_{e1} contiene a V_1^+ , V_1^- , y V_1^0 , mientras que V_{eH} contiene todos los voltajes no fundamentales. Para que un sistema funcione con máxima eficiencia, las ondas de voltaje deben ser senoidales y simétricas de frecuencia fundamental (V_1^+). La eficiencia disminuye cuando existen componentes de tensión asimétricas (V_1^- , y V_1^0) y distorsionadas (V_{eH}). Con el término THD_{eV} se puede hacer un análisis similar al realizado con el término THD_{el} , los resultados serían los mismos. El THD_{eV} aumenta si se eliminan V_1^- , y V_1^0 . Si se eliminan V_1^- , y V_1^0 existe una mejora de la calidad de la potencia y el THD_{eV} no debería aumentar. El THD_{eV} no debería depender de las tensiones fundamentales ineficientes. Tras el análisis realizado, el THD_{eV} (que ya fue mejora en el capítulo 1 (Ec. 1.149) es mejorado nuevamente y se propone utilizar la siguiente expresión:

$$THD_{eV*} = \frac{V_{eH\#}}{V_1^+} \quad (5.15)$$

Similarmente se proponen nuevos THD_V 's por fase ($z=a,b,c,n$) con la siguiente expresión:

$$THD_{Vz*} = \frac{V_{zH}}{V_1^+} \quad (5.16)$$

Los nuevos THD_V 's propuestos no dependen de V_1^0 , y V_1^- siendo de esta forma indicadores más adecuados para la evaluación de la distorsión armónica de tensión.

Propuesta de factor para evaluar la calidad de la potencia: en la IEEE Std. 1459-2010 no existe un factor que sirva para evaluar de forma general la calidad de la potencia. Los autores

en [100] afirman que un factor de potencia es la relación entre una potencia activa y una potencia aparente. En esta tesis, se escribirá un nuevo factor de potencia en términos de la potencia eficiente aprovechada por la carga (P_1^+) y el conjunto total de potencia aparente demandada por la carga ($S_{e\#}$). Los autores en [26], [101], también utilizan este factor pero no definen la potencia aparente ($S_{e\#}$) demandada por la carga con la misma expresión. El nuevo factor llamado factor de potencia total $P_{FT\#}$ es definido como sigue:

$$P_{FT\#} = \frac{P_1^+}{S_{e\#}} \quad (5.17)$$

El factor $P_{FT\#}$ mejor indicador de calidad de potencia porque compara la potencia eficiente aprovechada por la carga con la potencia aparente total demandada por la carga. El factor $P_{FT\#}$ valora la calidad de la potencia de la siguiente manera:

- Si $P_{FT\#}$ es 1 el sistema eléctrico trabaja con los estándares más altos de la calidad de potencia y toda la potencia entregada por el sistema eléctrico es aprovechada y convertida en potencia útil (P_1^+).
- Si $P_{FT\#}$ tiende a 0, en el sistema prevalecen las potencias ineficientes (Q_1^+ , $S_{eN\#}$, y $S_{U1\#}$).

El factor $P_{FT\#}$ valora la calidad de la potencia pero no es un indicador que permite identificar cada fenómeno ineficiente, por lo que debe ser usado en conjunto con otros indicadores para valorar mejor la calidad de la potencia.

5.3. Criterio 3: Contribuir con la estabilidad de los sistemas eléctricos.

La estabilidad es la propiedad de los sistemas eléctricos, o de sus partes y componentes, de mantenerse en estado de equilibrio energético o sincronismo cuando ha sido sometido a acciones perturbadoras. Existen diversas acciones perturbadoras en los sistemas eléctricos, entre las cuales se encuentran: maniobras para conectar o desconectar carga, maniobras de operación y mantenimiento de las redes eléctricas, arranque de grandes motores, fallas o cortocircuitos, descargas atmosféricas, entre otras. Ante tales perturbaciones, se debe garantizar que la variación del voltaje, de la corriente, y de la frecuencia, en todos los componentes del sistema eléctrico, no influya en su correcto funcionamiento. Uno de los efectos que influyen sustancialmente en la estabilidad de los sistemas eléctricos son los sag's o huecos de tensión. A continuación se explicará la forma en la que los SAPC's selectivos pueden contribuir a la estabilidad de los sistemas eléctricos en caso de ocurrencia de un hueco de tensión.

Un hueco de tensión es definido como una reducción de la tensión AC rms en por lo menos una de las fases del sistema eléctrico. Los huecos de tensión son ocasionados principalmente por fallas (cortocircuitos) o por el arranque de motores de inducción de potencia elevada en

cualquier punto del sistema eléctrico. En ambas situaciones se demanda grandes cantidades de corriente disminuyendo la tensión de operación de los sistemas eléctricos. Los huecos de tensión son realmente una consecuencia provocada por cualquier evento transitorio que demande altas densidades de corriente en algún punto de la red. Los huecos de tensión afectan a todas las cargas del sistema eléctrico pero en mayor medida afectan a las cargas más cercanas a donde ocurre el evento transitorio. Las fallas en los circuitos eléctricos inclusive pueden provocar huecos de tensión perjudiciales en distancias lejanas de donde se produjo el fallo.

Los huecos de tensión pueden ocasionar la desconexión de cargas sensibles y el paro de algunos procesos industriales, lo que repercute en la pérdida de la producción y la pérdida de capital. Los huecos de tensión son una caída de tensión transitoria de duración corta, bajo esta situación, es mejor que muchas de las cargas permanezcan conectadas evitando la interrupción a pesar de los trastornos que esto pueda causar. Los efectos de las interrupciones son peores que los efectos provocados por los huecos de tensión, sin embargo los huecos de tensión ocurren con mayor frecuencia ocasionando mayores perjuicios. Debido a su naturaleza transitoria, los huecos de tensión son uno de los problemas de la calidad de la potencia más difíciles de resolver. El porcentaje de ocurrencia y los efectos que provoca hace que los huecos de tensión sean un problema en el que numerosos investigadores enfoquen sus estudios [102]-[107].

De acuerdo a la norma UNE-EN 50160 [107], los huecos de tensión se pueden describir en base al voltaje mínimo rms del hueco de tensión o tensión de hueco (V_{min}) y a su duración, tal como se muestra en la figura 5-2.

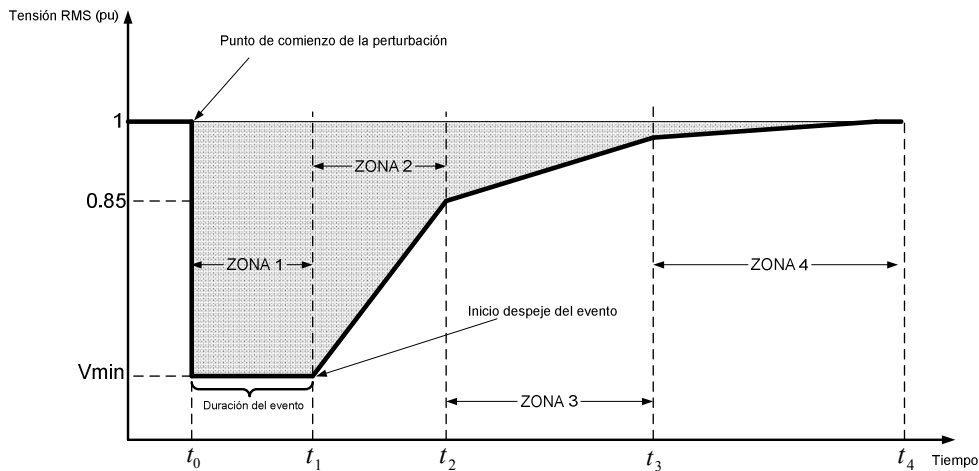


Figura 5-2. Hueco de tensión de acuerdo a la norma UNE-EN 50160.

La tensión de operación de los sistemas eléctricos debe mantenerse normalmente a 1 p.u, su variación permitida se encuentra entre 0.9 p.u y 1.1 p.u. Una disminución de la tensión se considera hueco de tensión cuando baja bruscamente a un valor entre 0.85 p.u y un valor mínimo (V_{min}) en un intervalo de tiempo comprendido entre 10 ms y 1 min (intervalo de tiempo comprendido entre t_0 y t_2). V_{min} se establece igual a 0.2 p.u cuando ocurren cortocircuitos trifásicos, bifásicos y monofásicos a tierra, mientras que para cortocircuitos bifásicos aislados de tierra V_{min} es 0.6 p.u. Si la tensión es menor a V_{min} no se considera hueco de tensión si no que se considera interrupción. Si el tiempo de la reducción de la tensión es mayor a 1 min, tampoco se considera hueco de tensión si no que se considera subtensión permanente.

En el instante de tiempo t_0 se inicia una perturbación de la onda de tensión, ya que esta disminuye a V_{min} . En la zona 1, correspondiente al intervalo de tiempo comprendido entre t_0 y t_1 , la tensión permanece en su valor mínimo, indicando que se ha producido una falla o un motor se encuentra en su estado inicial de arranque. En el instante t_1 se ha aclarado la falla o se ha terminado de arrancar el motor, por lo que el sistema empieza a recuperarse y la tensión en la red empieza a aumentar. La zona 2 correspondiente al intervalo de tiempo comprendido entre t_1 y t_2 es una zona de recuperación de la tensión pero aún se considera hueco de tensión ya que la tensión es menor a 0.85 p.u. En el instante t_2 , la tensión es 0.85 p.u y continua subiendo, en este instante finaliza el hueco de tensión. La zona 3, correspondiente al intervalo de tiempo comprendido entre t_2 y t_3 , es una zona de recuperación de la tensión no considerada como hueco de tensión pero considerada anormal debido a que la tensión es menor a 0.9 p.u. A partir del instante t_3 la tensión es igual a 0.9 p.u y se empieza a considerar normal, distinguiéndose la zona 4, comprendida entre los instantes de tiempo t_3 y t_4 , como zona de recuperación en condiciones normales.

5.3.1. Análisis de las principales causas que provocan los huecos de tensión.

Los huecos de tensión no aparecen por sí solos y realmente son un efecto o síntoma de una causa. Las principales causas que provocan los huecos de tensión son:

- Cortocircuitos o fallas eléctricas en cualquier punto del sistema eléctrico de potencia.
- Arranque de los motores de inducción especialmente motores de gran capacidad.

A continuación se analizarán cada una de estas causas y se establecerán sus características principales.

Cortocircuitos o fallas eléctricas: los cortocircuitos o fallos en las redes eléctricas son de diversas características, sin embargo todos se identifican por la alta densidad de energía que

demandan. En la figura 5-3 se muestra el diagrama unifilar de un sistema eléctrico trifásico en el que se ha producido un cortocircuito.

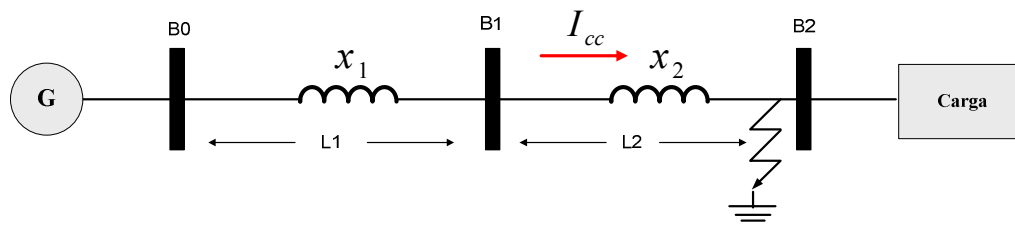


Figura 5-3. Cortocircuito en sistema eléctrico.

El sistema eléctrico de la figura 5-3 está compuesto por un generador G que entrega tensiones trifásicas senoidales y simétricas de frecuencia fundamental (V_1^+). El generador está conectado a una carga eléctrica mediante las líneas L1 y L2 de reactancias x_1 y x_2 respectivamente. En la línea L2 cerca a la barra 2 (B2), se produce un cortocircuito trifásico franco a tierra (cortocircuito equilibrado). Las tensiones en B2 disminuyen a cero por lo que la carga no absorbe corriente de la red. En las barras B0 y B1 se produce una disminución de las tensiones. Si las tensiones en B0 y B1 son menores a 0.85 p.u, el cortocircuito en B2 es la causa del hueco de tensión provocado en B0 y B1. El generador debe suministrar la corriente I_{cc} para satisfacer la demanda energética del cortocircuito. En la figura 5-4 se muestra el circuito equivalente por fase del sistema eléctrico de la figura 5-3.

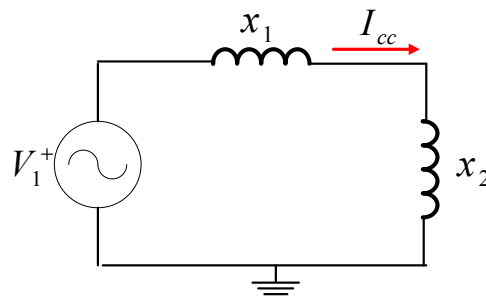


Figura 5-4. Circuito equivalente por fase del sistema eléctrico de la figura 5-3.

La corriente I_{cc} está dada por:

$$I_{cc} = I_1^{+r} = \frac{V_1^+}{(x_1 + x_2)j} \quad (5.18)$$

Cuando se produce el cortocircuito la corriente I_{cc} sólo está limitada por las reactancias x_1 y x_2 , por lo que I_{cc} tiene una magnitud muy alta y es de predominancia inductiva. Desde el punto de vista del generador, los cortocircuitos se pueden considerar como cargas que demandan grandes cantidades de Q_1^+ .

Arranque de motores de inducción: en la figura 5-5 puede verse el circuito equivalente de un motor de inducción por fase en el inicio del arranque cuando está alimentado mediante un sistema de tensiones trifásico, senoidal, y simétrico de frecuencia fundamental (V_1^+).

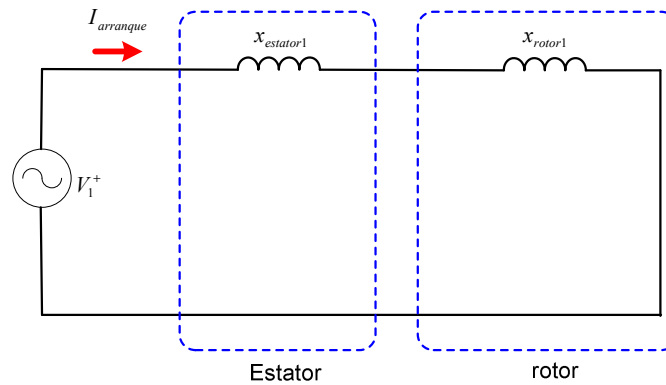


Figura 5-5. Circuito equivalente de motor de inducción en el arranque.

En el inicio del arranque, la carga mecánica del motor de inducción se comporta como si fuera un cortocircuito. La corriente $I_{arranque}$ está dada por:

$$I_{arranque} = I_1^{+r} = \frac{V_1^+}{(x_{estator1} + x_{rotor1})j} \quad (5.19)$$

En el inicio del arranque la corriente $I_{arranque}$ sólo está limitada por las reactancias $x_{estator1}$ y x_{rotor1} , por lo que $I_{arranque}$ tiene una magnitud muy alta y es prácticamente inductiva. Debido a la demanda de corrientes altas, la tensión en el sistema eléctrico puede disminuir provocando huecos de tensión. Realmente el arranque de un motor de inducción es un estado de cortocircuito que se produce en los sistemas eléctricos, la diferencia con un cortocircuito convencional es que a medida que el motor va arrancando se va despejando el estado de cortocircuito. Cuando se inicia el arranque la red eléctrica debe suministrar al motor un valor muy alto de Q_1^+ . A medida que el motor va adquiriendo velocidad, la demanda de Q_1^+ empieza a disminuir mientras que la demanda de P_1^+ empieza a aumentar.

Tanto las corrientes de cortocircuito I_{cc} como las corrientes de arranque $I_{arranque}$ tienen valores rms muy altos y suceden en instantes de tiempo relativamente cortos por lo que provocan huecos de tensión en los sistemas eléctricos de potencia. Generalizando, cuando ocurre un hueco de tensión es porque el sistema eléctrico en algún punto de la red demanda grandes cantidades de Q_1^+ . La gran demanda de Q_1^+ debe ser suministrada por todos los generadores conectados en el sistema eléctrico. La mayoría de los generadores conectados son máquinas sincrónicas, por lo que a continuación se analizará su estabilidad cuando se les demanda Q_1^+ .

5.3.2. Análisis de estabilidad del generador síncrono.

Para el análisis del generador síncrono se supondrá que está conectado a un sistema de potencia infinita. Bajo esta afirmación, la frecuencia y la tensión de la red son constantes y no cambian ante las variaciones que se producen en el sistema eléctrico. Un generador síncrono se considera estable si su velocidad de rotación es igual a la velocidad de sincronismo, de lo contrario se considera inestable. Los cambios bruscos de carga, cortocircuitos, arranque de motores pueden ocasionar inestabilidad de todas las máquinas conectadas al sistema. A continuación, en un primer caso se analizará un generador síncrono trabajando en una zona considerada estable, y en un segundo caso se analizará el generador síncrono trabajando en una zona considerada inestable.

Generador síncrono trabajando en una zona considerada estable: en esta situación se considera el sistema eléctrico de la figura 5-6, con la máquina síncrona trabajando como generador alimentando una carga resistiva e inductiva.

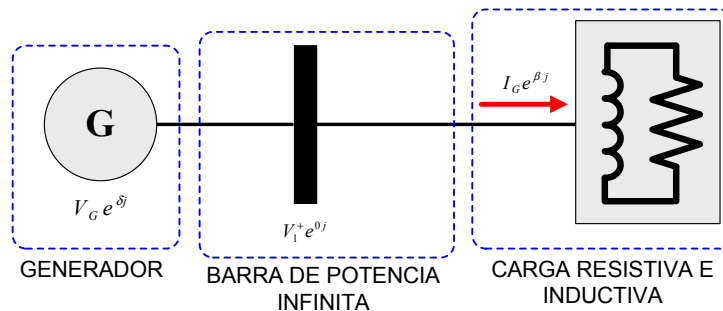


Figura 5-6. Generador síncrono alimentando carga resistiva-inductiva.

El voltaje de la barra de potencia infinita es senoidal y simétrico de frecuencia fundamental (V_1^+), además es constante y es tomado como referencia de los ángulos ($\alpha=0$ rad). La carga demanda una corriente resistiva e inductiva cuyo valor rms es I_G y ángulo β . El ángulo β es negativo debido a que la carga es resistiva e inductiva. El voltaje interno generado en la máquina tiene valor rms V_G y ángulo δ . El ángulo δ es llamado ángulo de carga, ya que depende de la carga conectada al generador. En el análisis se supondrá que la reactancia por fase en el generador es x_G y se despreciará la resistencia interna por fase del generador. El diagrama fasorial puede verse en la figura 5-7.

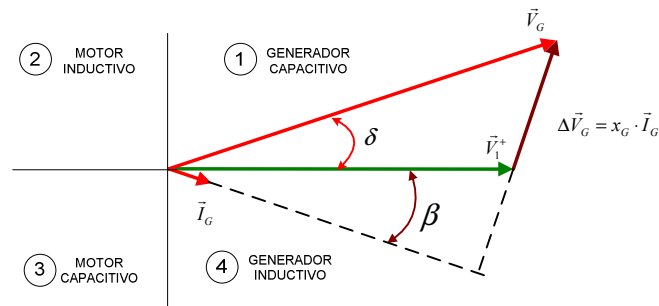


Figura 5-7. Diagrama fasorial del sistema eléctrico bajo estudio.

En el diagrama fasorial de la figura 5-7 se distinguen 4 zonas.

- Si la corriente \vec{I}_G se encuentra en el primer cuadrante la máquina trabaja como generador y suministra potencia activa y potencia reactiva capacitiva a la red.
- Si la corriente \vec{I}_G se encuentra en el segundo cuadrante la máquina trabaja como motor y demanda potencia activa y potencia reactiva inductiva de la red.
- Si la corriente \vec{I}_G se encuentra en el tercer cuadrante la máquina trabaja como motor y demanda potencia activa y potencia reactiva capacitiva de la red.
- Si la corriente \vec{I}_G se encuentra en el cuarto cuadrante la máquina trabaja como generador y suministra potencia activa y potencia reactiva inductiva a la red.

El caso analizado, en el que la máquina alimenta una carga resistiva e inductiva, corresponde a la máquina trabajando como generador con \vec{I}_G en el cuarto cuadrante. Esta condición es habitual entre los generadores eléctricos debido a que la mayoría de las cargas son resistivas e inductivas.

El ángulo de carga δ es el parámetro usado comúnmente para evaluar la estabilidad de las máquinas sincrónicas. Para que el generador trabaje de forma estable, el ángulo de carga δ debe de estar entre $\pi/6$ rad y $\pi/3$ rad. Si δ es menor a $\pi/6$ rad significa que \vec{I}_G se encuentra en el cuarto cuadrante muy cerca del semieje negativo de las ordenadas. Esto es considerado inapropiado ya que \vec{I}_G podría pasar fácilmente al tercer cuadrante presentándose motorización del generador. Si δ es mayor a $\pi/3$ no se puede garantizar en el generador la potencia suficiente para suplir las necesidades ante cualquier variación de la carga.

Generador sincrónico trabajando en una zona considerada inestable: en la figura 5-8 puede verse el mismo sistema eléctrico de la figura 5-6 pero la carga es netamente inductiva.

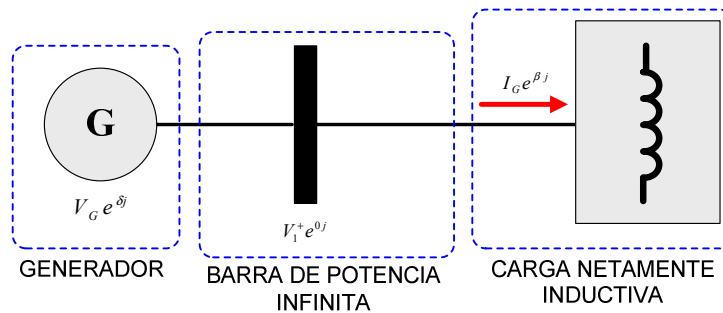


Figura 5-8. Generador alimentando carga netamente inductiva.

El voltaje de la barra de potencia infinita es senoidal y simétrico de frecuencia fundamental (V_1^+), además es constante y es tomado como referencia de los ángulos ($\alpha=0$ rad). La carga demanda una corriente inductiva cuyo valor rms es I_G y ángulo β . El ángulo β es $-\pi/2$ debido a que la carga es netamente inductiva. Esta situación es ideal pero puede presentarse cuando existen cortocircuitos o cuando se inicia el arranque de los motores de inducción. El diagrama fasorial puede verse en la figura 5-9.

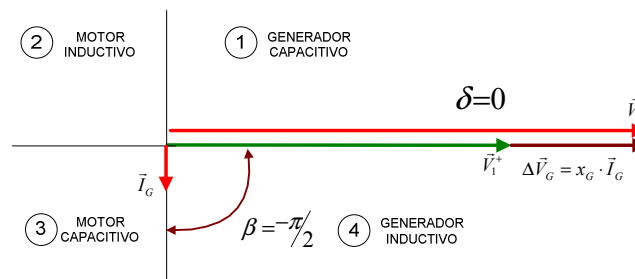


Figura 5-9. Diagrama fasorial del sistema eléctrico bajo estudio.

El voltaje interno \vec{V}_G se encuentra en fase con \vec{V}_1^+ por lo que $\delta=0$. La corriente \vec{I}_G se encuentra sobre el semieje negativo de las ordenadas, este semieje es uno de los límites de la máquina, la máquina trabaja como generador suministrando potencia reactiva inductiva y a su vez trabaja como motor demandando potencia reactiva capacitiva. En este punto de operación la máquina sincrónica trabaja simultáneamente como motor y como generador y no demanda ni suministra potencia activa a la red. El principal objetivo de la máquina es suministrar potencia reactiva inductiva a la carga y por eso fue conectada, así que el control debe ser enfocado para que la máquina trabaje como generador en el cuarto cuadrante. El control del generador en este punto es bastante complejo pues cualquier variación de la velocidad, la carga, o la corriente de excitación pueden ocasionar que empiece a trabajar en el tercer cuadrante ocasionando su motorización. Si el generador se motoriza empieza a demandar potencia activa de la red y surgen problemas de estabilidad ya que el generador se

puede salir de sincronismo. Si el generador se sale de sincronismo puede provocar que otras máquinas conectadas al sistema eléctrico salgan de sincronismo ocasionando problemas serios de estabilidad. Esta es la razón por la cual los generadores conectados a los sistemas de potencia infinita deben de trabajar en una zona segura en el cuarto cuadrante con un ángulo de carga δ superior a $\pi/6$ rad.

5.3.3. Compensación selectiva para disminuir los efectos de los huecos de tensión.

Los huecos de tensión son efectos debido a que en algún lugar del sistema eléctrico se produce un fallo o se está arrancando un motor inducción. El SAPC puede detectar fácilmente la aparición de un hueco de tensión, ya que este tiene incorporado sensores para la medida en cada instante de las tensiones de red. El SAPC es un dispositivo electrónico usado como fuente de corriente controlada por lo que no puede ser usado como dispositivo de compensación de huecos de tensión. Sin embargo, los huecos de tensión son un efecto que indica que el sistema eléctrico demanda grandes cantidades de Q_1^+ . Para contribuir eficazmente con la demanda excesiva de Q_1^+ durante la aparición del hueco de tensión, el SAPC debería inyectar I_1^{+r} , disminuyendo los efectos nocivos provocados por los huecos de tensión. Para comenzar el análisis se tendrá en cuenta el sistema eléctrico trifásico cuyo diagrama unifilar es mostrado en la figura 5-10:

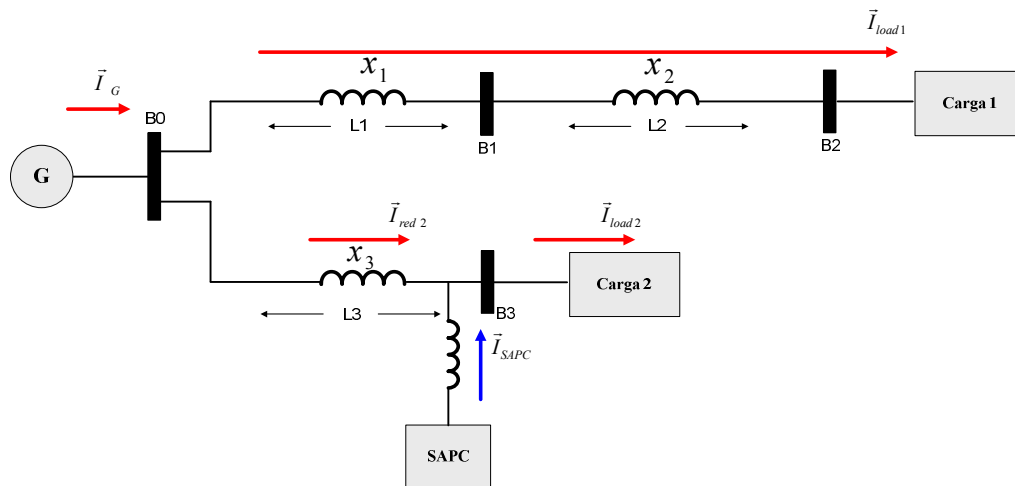


Figura 5-10. Sistema eléctrico trabajando de forma estable.

En la figura 5-10 se muestra el diagrama unifilar de un sistema eléctrico trifásico con un generador que alimenta dos cargas. La carga 1 es alimentada a través de de las líneas L1 y L2 demandando la corriente \vec{I}_{load1} . La carga 2 es alimentada a través de la línea L3 y

demanda la corriente \vec{I}_{load2} . Cerca a la carga 2 se conecta un SAPC que suministra \vec{I}_{SAPC} , mientras que el generador entrega \vec{I}_{red2} ($\vec{I}_{load2} = \vec{I}_{red2} + \vec{I}_{SAPC}$). El sistema eléctrico trabaja normalmente y el generador se encuentra en la zona estable del cuarto cuadrante. Se considera un sistema de potencia infinita donde la tensión y la frecuencia de la red no varían con facilidad. A continuación se analizarán tres situaciones.

- En la primera situación se analiza el sistema eléctrico funcionando normalmente.
- En la segunda situación se analiza el sistema eléctrico cuando se presenta un cortocircuito trifásico equilibrado en algún punto de la red provocando huecos de tensión.
- En la tercera situación se analiza el sistema eléctrico con el cortocircuito y con el SAPC inyectando I_1^{+r} .

Primera situación, sistema eléctrico funcionando normalmente: En esta situación se considera el sistema de la figura 5-10 trabajando normalmente. El generador suministra la corriente I_G , compuesta por I_{load1} e I_{red2} . El SAPC suministra mediante I_{SAPC} las corrientes ineficientes que demanda la carga 2. El diagrama fasorial en el generador de esta situación es mostrado en la figura 5-11.

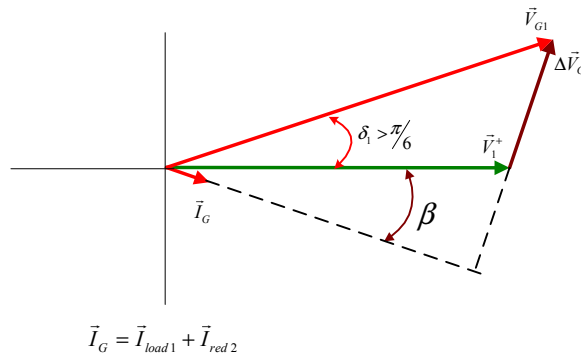


Figura 5-11. Diagrama fasorial del sistema eléctrico de la figura 5-10.

El generador trabaja de forma estable en el cuarto cuadrante. El ángulo de carga δ_1 es mayor a $\pi/6$ garantizando las condiciones de estabilidad. A continuación se estudiará la situación en la que se presenta un cortocircuito en este sistema eléctrico.

Segunda situación, sistema eléctrico en cortocircuito: en la figura 5-12 se muestra el mismo sistema eléctrico de la figura 5-10 cuando se presenta un cortocircuito en la barra B2 cerca a la carga 1.

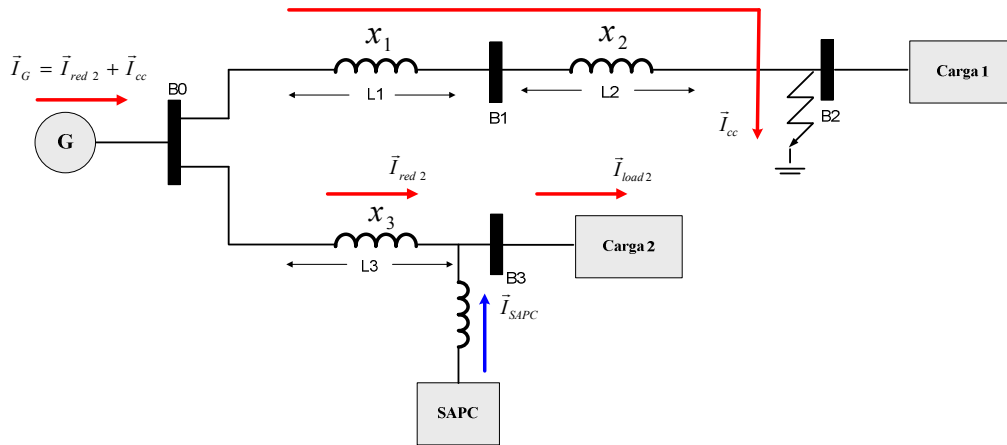


Figura 5-12. Sistema eléctrico con cortocircuito en la barra B2.

La tensión de la barra B2 es cero y la carga 1 es desconectada por ausencia de tensión. El cortocircuito provoca un hueco de tensión que se puede notar en las barras B0, B1, y B3. El generador debe suministrar la corriente I_G compuesta por I_{cc} que demanda el corto y la corriente I_{red2} que demanda la carga 2. El SAPC continúa suministrando I_{SAPC} a la carga 2. El diagrama fasorial en el generador de esta situación es mostrado en la figura 5-13.

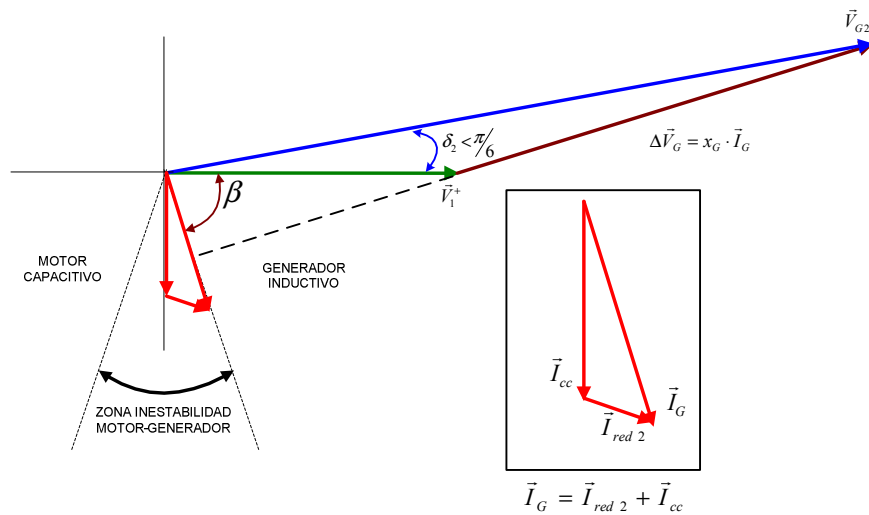


Figura 5-13. Diagrama fasorial del sistema eléctrico de la figura 5-12.

En condiciones de fallo, el generador debe suministrar una corriente más grande y más inductiva. Esto implica que el ángulo β se acerca más a $-\pi/2$, por lo que el ángulo de carga δ_2 en condiciones de corto es menor que el ángulo de carga δ_1 antes del fallo. En este caso, el

ángulo de carga δ_2 es menor que $\pi/6$, por lo que la corriente I_G entra en una zona en la cual se puede generar inestabilidad motorizando el generador y saliéndose de sincronismo.

Tercera situación, sistema eléctrico en cortocircuito e inyección de I_1^{+r} mediante el SAPC: para sacar al generador de la zona inestable es posible usar el SAPC. Si el SAPC ante la presencia de un hueco de tensión inyecta al sistema la corriente inductiva $I_{1_SAPC}^{+r}$, el generador deja de suministrar parte de la corriente inductiva demandada por el corto, asegurando una zona segura de operación. Toda la potencia disponible en el SAPC es utilizada para inyectar $I_{1_SAPC}^{+r}$ al corto, por lo que I_{SAPC} no es suministrada por el SAPC a la carga 2. La corriente I_{SAPC} debe ser suministrada a la carga por el generador, pero sin embargo, se supondrá muy pequeña con respecto a $I_{1_SAPC}^{+r}$ ($I_{SAPC} \ll I_{1_SAPC}^{+r}$) no siendo considerada en el análisis ($I_{SAPC} \approx 0$, $I_{red2} \approx I_{load2}$). En la figura 5-14 se muestra el sistema eléctrico de potencia con el fallo y utilizando el SAPC.

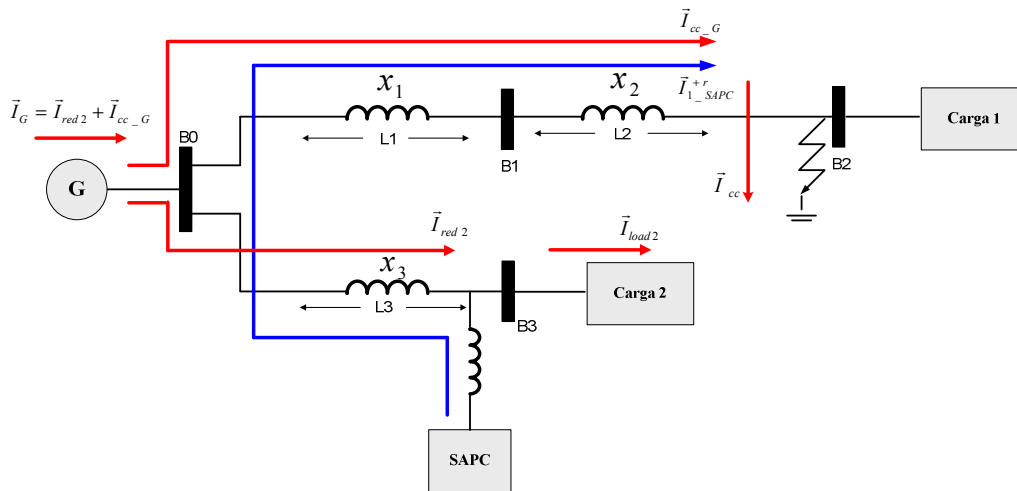


Figura 5-14. Sistema eléctrico con cortocircuito en la barra B2 e inyectando I_1^{+r} con el SAPC.

La corriente $I_{1_SAPC}^{+r}$ (suministrada por el SAPC) y la corriente I_{cc_G} (suministrada por el generador) son inyectadas al cortocircuito ($\vec{I}_{cc} = \vec{I}_{1_SAPC}^{+r} + \vec{I}_{cc_G}$). La inyección de $I_{1_SAPC}^{+r}$ disminuye la corriente inductiva que debe suministrar el generador al cortocircuito ayudando al generador a suministrar la corriente inductiva que demanda el corto. Gracias al SAPC, el generador debe suministrar menos potencia reactiva contribuyendo con la salida del generador de la zona inestable. En la figura 5-15 se muestra el diagrama fasorial tras el uso del SAPC para inyectar $I_{1_SAPC}^{+r}$.

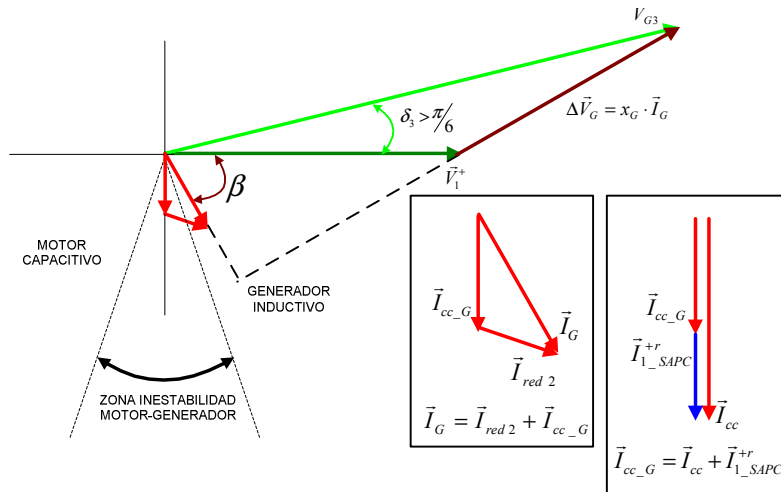


Figura 5-15. Diagrama fasorial del sistema eléctrico de la figura 5-14.

La corriente reactiva que suministra el generador al corto es menor tras el uso del SAPC. El ángulo de carga δ_3 es mayor que el ángulo de carga δ_2 antes de usar el SAPC. Tras el uso del SAPC y después de que el SAPC reacciona, la corriente I_G entra en una zona estable en el que el generador trabaja más descargado. El riesgo de que el generador se motorice y pierda el sincronismo es menor.

El anterior análisis se realizó suponiendo que $I_{SAPC} \ll I_{1_SAPC}^{+r}$, la variación de δ_3 dependerá de esta premisa. Si las corrientes ineficientes demandadas por la Carga 2 contienen principalmente componentes reactivas de corriente, la corriente reactiva (antes suministrada por el SAPC a la carga 2) es suministrada por el generador a la carga 2 y la variación de δ_3 es mínima ($\delta_3 \approx \delta_2$). Si las corrientes ineficientes demandadas por la carga 2 contienen principalmente componentes de corriente no fundamental y componentes de corriente desequilibrada, el ángulo de carga δ_3 tiende aproximarse o ser mayor que $\pi/6$ (generador en la zona estable), esto se debe a que las componentes de corriente no fundamental y las componentes de corriente desequilibrada no contribuyen sustancialmente con la variación de β (no desfasan).

5.3.4. Análisis del hueco de tensión cuando el SAPC inyecta I_1^{+r} .

En el momento del fallo no se utiliza el SAPC para compensar el hueco de tensión. El SAPC se utiliza para inyectar I_1^{+r} contribuyendo con la estabilidad del sistema. La inyección de I_1^{+r} actúa diferente en las distintas zonas identificadas en el hueco de tensión de la figura 5-2:

En la zona 1, en la que se presenta el cortocircuito entre los instantes de tiempo t_0 y t_1 , la inyección de I_1^{+r} con el SAPC contribuye a la estabilidad de los generadores sincrónicos conectados. La corriente inductiva suministrada por el generador es menor, por lo que el

generador presenta menos riesgo de motorizarse. La inyección de I_1^{+r} no contribuye a la variación del voltaje mínimo (V_{min}) pero contribuye a la estabilidad del sistema.

En la zonas 2, 3, y 4 en las que se ha despejado la falla, la inyección de I_1^{+r} con el SAPC contribuye a la disminución de los tiempos de despeje t_2 , t_3 , y t_4 . Esto se debe a que tras inyectar Q_1^+ el ángulo de carga aumenta de δ_2 a δ_3 . En este periodo de despeje el ángulo de carga debe volver al ángulo de carga inicial δ_1 , ver figura 5-16

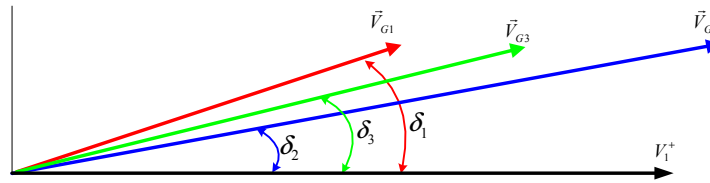


Figura 5-16. Voltaje interno y ángulo de carga del generador antes del corto, durante el corto, y durante el corto inyectando Q_1^+ con el SAPC.

Variando la corriente de excitación es posible variar el ángulo de carga y con esto controlar la potencia activa y la potencia reactiva que suministra el generador. Tras el despeje de la falla, el generador debe volver a sus condiciones habituales de trabajo con un ángulo de carga igual a δ_1 y un voltaje interno generado igual a V_{G1} . Las máquinas sincrónicas al estar compuestas de sistemas mecánicos inerciales presentan respuestas lentas ante cualquier condición de trabajo, por lo que para el generador es más fácil volver a δ_1 partiendo de δ_3 que partiendo de δ_2 . Si se parte de δ_3 se puede reducir los tiempos de despeje t_2 , t_3 , y t_4 en el hueco de tensión, llegando rápidamente a una condición normal de operación. La reducción del tiempo de despeje en el hueco de tensión inyectando I_1^{+r} ha sido comprobado mediante simulación en [102]. Ante este tipo de eventos, los SAPC's deben de utilizar toda su potencia disponible para entregar al sistema eléctrico Q_1^+ , mejorando la estabilidad del sistema y reduciendo el tiempo de despeje del hueco de tensión. Los autores en [103]-[109] también recomiendan la inyección de potencia reactiva a la red cuando ocurre un hueco de tensión.

Cuando ocurre un hueco de tensión en España los operadores de instalaciones eólicas deben de utilizar el procedimiento operativo 12.3 (P.O. 12.3) para garantizar la continuidad del suministro [108]. El Ministerio de Industria, Turismo y Comercio en el BOE núm. 254 aprobó el P.O 12.3 en la resolución del 4 de octubre de 2006. El P.O 12.3 reúne los requisitos de respuesta frente a huecos de tensión en las instalaciones eólicas. Ante la ocurrencia de un hueco de tensión el P.O 12.3 básicamente lo que exige es que los generadores eólicos inyecten Q_1^+ al sistema eléctrico. Este procedimiento operativo puede adaptarse fácilmente a todos los inversores de potencia conectados a la red eléctrica y en especial a los SAPC's selectivos.

El P.O 12.3 diferencia entre dos tipos de huecos de tensión. El primero provocado por faltas equilibradas (trifásicas) y el segundo provocado por faltas desequilibradas (monofásicas y bifásicas). A continuación se cita textualmente el P.O 12.3:

Faltas equilibradas (trifásicas): tanto durante el periodo de mantenimiento de la falta, como durante el periodo de recuperación de tensión posterior al despeje de la misma, no podrá existir en el punto de conexión a la red, consumo de potencia reactiva por parte de la instalación.

No obstante lo anterior, se admiten consumos puntuales de potencia reactiva durante los 150 ms inmediatamente posteriores al inicio de la falta y los 150 ms inmediatamente posteriores al despeje de la misma, y ello, siempre y cuando se cumplan las siguientes condiciones:

- Durante un periodo de 150 ms desde que se produce la falta, el consumo neto de potencia reactiva de la instalación, en cada ciclo (20 ms), no deberá ser superior al 60% de su potencia nominal registrada.
- Durante los primeros 150 ms desde que se despeja la falta, el consumo neto de energía reactiva no deberá ser superior al 60% de su potencia nominal y el consumo neto de intensidad reactiva de la instalación, en cada ciclo (20 ms), no deberá ser superior a 1,5 veces la intensidad correspondiente a su potencia nominal registrada.

De forma paralela, tanto durante el periodo de mantenimiento de la falta, como durante el periodo de recuperación de tensión posterior al despeje de la misma, no podrá existir en el punto de conexión a la red, consumo de potencia activa por parte de la instalación.

No obstante lo anterior, en este caso se admite también la existencia de consumos puntuales de potencia activa durante los 150 ms inmediatamente posteriores al inicio de la falta y los 150 ms inmediatamente posteriores al despeje de la misma. Adicionalmente se permiten consumos de potencia activa durante el resto de la falta, siempre que no sean superiores al 10% de su potencia nominal registrada.

Tanto durante el periodo de falta como durante el periodo de recuperación de tensión posterior al despeje de la misma, la instalación deberá aportar al sistema eléctrico la máxima intensidad posible (I_{total}).

Esta aportación de intensidad por parte de la instalación al sistema eléctrico se efectuará de forma que el punto de funcionamiento de la instalación se localice dentro del área sombreada en la figura 5-2 (Figura 5-2 en la tesis), antes de transcurridos 150 ms desde el inicio de la falta o desde el instante de despeje de la falta. Así, para tensiones inferiores a 0,85 p.u, en el punto de conexión a red, la instalación deberá generar potencia reactiva, mientras que para tensiones comprendidas entre 0,85 p.u y el valor de la tensión mínima admisible para la operación normal del sistema eléctrico, la instalación no deberá consumir potencia reactiva.

Para valores de tensión superiores a la tensión mínima admisible en operación normal aplicará lo establecido en los procedimientos de operación para dicha operación normal.

Faltas desequilibradas (monofásicas y bifásicas): tanto durante el periodo de mantenimiento de la falta, como durante el periodo de recuperación de tensión posterior al despeje de la misma, no podrá existir en el punto de conexión a la red, consumo de potencia reactiva por parte de la instalación.

No obstante lo anterior, se admiten consumos puntuales de potencia reactiva durante los 150 ms inmediatamente posteriores al inicio de la falta y los 150 ms inmediatamente posteriores al despeje de la misma. Adicionalmente se permiten consumos transitorios durante el resto de la falta siempre que se cumplan las siguientes condiciones:

- El consumo neto de energía reactiva de la instalación no deberá ser superior a la energía reactiva equivalente al 40% de la potencia nominal registrada de la instalación durante un periodo de 100 ms.
- El consumo neto de potencia reactiva de la instalación, en cada ciclo (20 ms), no deberá ser superior al 40% de su potencia nominal registrada.

De forma paralela, tanto durante el periodo de mantenimiento de la falta, como durante el periodo de recuperación de tensión posterior al despeje de la misma, no podrá existir en el punto de conexión a la red, consumo de potencia activa por parte de la instalación.

No obstante lo anterior, en este caso se admite igualmente la existencia de consumos puntuales de potencia activa durante los 150 ms inmediatamente posteriores al inicio de la falta y los 150 ms inmediatamente posteriores al despeje de la misma.

Durante el resto del periodo de mantenimiento de la falta, se admiten consumos de potencia activa, siempre y cuando se cumplan las siguientes condiciones:

- El consumo neto de energía activa no deberá ser superior a la energía activa equivalente al 45% de la potencia nominal registrada de la instalación durante un periodo de 100 ms.
- El consumo de potencia activa, en cada ciclo (20 ms), no deberá ser superior al 30% de su potencia nominal registrada.

Las instalaciones existentes a la fecha de inicio de aplicación de este procedimiento estarán exentas del cumplimiento de los requisitos relativos a los consumos de potencia activa y reactiva durante faltas desequilibradas, establecidos en este apartado 5.2, salvo en el caso de que en la instalación se lleven a cabo importantes actuaciones de renovación y mejora.

5.4. Criterio 4: Minimizar el costo de la factura eléctrica.

La IEEE Std. 1459-2010 propone una elegante descomposición de términos de potencia e identifica cada fenómeno que los ocasiona (desfase, distorsión y desequilibrio). Uno de sus principales objetivos es medir, facturar, y cuantificar la potencia eléctrica. En la IEEE Std. 1459-2010, la mayoría de los términos de potencia son usualmente expresados en función de ciertos componentes de voltaje y de corriente. Se distinguen particularmente términos de potencia debido a la existencia de voltajes ineficientes y términos de potencia debido a la existencia de corrientes ineficientes. De forma general, cuando la demanda de potencia se debe a la existencia de voltajes ineficientes, esta demanda es atribuida al sistema eléctrico u operador de red. Y cuando la demanda de potencia se debe a la existencia de corrientes ineficientes, esta demanda es atribuida a la carga o usuario final. Las componentes de corriente de la carga pueden provocar la aparición de componentes de voltaje y viceversa. Sin embargo, para la mayor parte de los usuarios, cuya demanda de potencia es pequeña en comparación con la potencia total del sistema eléctrico de distribución, el voltaje fase-neutro está impuesto por la red eléctrica y una eventual variación de voltaje por parte de la carga es prácticamente nula. Las tres potencias ineficientes que demanda la carga y definidas por la IEEE Std. 1459-2010 son S_{eN} , S_{U1} , y Q_1^+ .

A pesar de que en la IEEE Std. 1459-2010 se distinguen claramente los términos de S_{eN} provocados por voltajes y corrientes armónicas aún no se ha llegado a un consenso de cómo evaluar la responsabilidad y penalizar la demanda de S_{eN} , ya que las corrientes armónicas a su vez provocan voltajes armónicos y viceversa. La demanda de S_{eN} se ha incrementado significativamente los últimos años, no obstante, debido a que aún existen dudas acerca de la detección de la fuente de la distorsión armónica, no se penaliza a los usuarios por su demanda. En la IEEE Std. 519-1992 [99], se proponen unos límites para reducir la distorsión armónica en los sistemas eléctricos, aunque la IEEE Std. 519 no es estándar de riguroso cumplimiento. La IEEE Std. 519-1992 es un estándar de recomendaciones para mejorar la calidad de la potencia eléctrica. Cuando se pueda determinar con total certeza las fuentes de distorsión armónica será posible determinar las responsabilidades en la polución de los sistemas eléctricos.

S_{U1} cuantifica la potencia eléctrica provocada por el desequilibrio de corrientes y la asimetría de tensiones de los sistemas eléctricos. En la IEEE Std. 1459-2010 no existen términos de potencia para determinar independientemente si el desequilibrio es provocado por corrientes desequilibradas o por tensiones asimétricas. Una nueva división para S_{U1} fue propuesta por [23] en la cual se distinguen los términos de potencia provocados por componentes de voltaje asimétricas y por las componentes de corriente desequilibradas (S_{U1B} , S_{U1V} , y S_{U1U}). S_{U1B} es el término de potencia provocado por las corrientes desequilibradas demandadas por la carga. S_{U1V} es el término de potencia provocado por la asimetría de voltaje en el pcc. S_{U1U} es el término de potencia provocado por las corrientes desequilibradas que demanda la carga y por la asimetría de voltaje en el pcc. Estos términos de potencia fueron resumidos en la sección 1.2.1 del capítulo 1, y pueden ser usados en un futuro para evaluar y sancionar, a las empresas de

energía y los usuarios finales, por la demanda de potencias ineficientes causadas por sistemas asimétricos de tensiones o por el desequilibrio de las corrientes de las cargas.

Q_1^+ cuantifica el fenómeno de la carga relativo al desfase de la corriente reactiva fundamental de secuencia positiva (I_1^{+r}) con respecto al voltaje fundamental de secuencia positiva (V_1^+). El desfase de I_1^{+r} con respecto V_1^+ se debe exclusivamente a la instalación de cargas reactivas tales como inductores y condensadores. Las cargas más comunes que poseen inductores son los motores, transformadores, y reactores. Los condensadores son usualmente usados para reducir la corriente reactiva inductiva que demandan las cargas. Así que el motivo por el cual la carga demanda Q_1^+ está plenamente identificado y se debe exclusivamente al usuario o carga del sistema. Actualmente Q_1^+ es medida por los contadores de energía y es facturada al usuario final.

España en conformidad con la unión europea recoge las definiciones para la medida de potencia en la norma UNE-EN 62052-11 [109]. La normativa que regula la medida de los contadores electromecánicos se encuentra especificada en las normas UNE-EN 50470-1 [110], UNE-EN 50470-2 [111], y UNE-EN 50470-3 [112]. La normativa que regula la medida de los contadores estáticos se encuentra especificada en las normas UNE-EN 62053-21 [113], UNE-EN 62053-22 [114], y UNE-EN 62053-23 [115]. En realidad estas normas UNE siguen las recomendaciones propuestas en la IEEE Std. 100 para identificar las magnitudes eléctricas [5]. La medición de estas magnitudes sólo contemplan los casos donde los voltajes son senoidales y simétricos de frecuencia fundamental (V_1^+) y las corrientes son senoidales y equilibradas de frecuencia fundamental (I_1^+). Con estas normas realmente sólo se realiza la medición de P_1^+ y Q_1^+ para cada instante de tiempo. De acuerdo al grado de desequilibrio o de distorsión de los sistemas eléctricos, estas normas UNE lo que presentan es un procedimiento de cálculo en el error de la medida. Utilizando los términos de potencia definidos en la IEEE Std. 1459-2010 se determinará lo que realmente miden los medidores de potencia comerciales cuando existen tensiones asimétricas y distorsionadas, y cuando existen corrientes distorsionadas, desequilibradas y desfasadas.

La medición que realizan los contadores electromecánicos es la misma medición que realizan los contadores estáticos, la diferencia radica en el procedimiento utilizado en la medición. Los contadores estáticos obtienen los voltajes y las corrientes instantáneas por fase, dependiendo de su diseño utilizan hardware o software para entregar una salida proporcional a la medida de la potencia demandada en cada instante de tiempo.

El principio de funcionamiento de los medidores electromecánicos de potencia activa es similar al principio de funcionamiento de los motores de inducción. Estos medidores están compuestos básicamente por unas bobinas de tensión y un disco con la capacidad para girar libremente. Los voltajes de la red generan un campo magnético en el medidor, mientras que las corrientes de la carga provocan la inducción de corrientes parasitas en el disco. La

interacción entre el campo magnético y las corrientes del disco provocan el movimiento del disco. Sólo las componentes activas de corriente provocan el movimiento del disco, por lo que es proporcional a la potencia activa que demanda la carga. De acuerdo a lo expuesto en [116]-[117], la potencia activa que se obtiene en cada instante de tiempo con el instrumento de medida es:

$$P = P_1^+ + P_1^- + P_1^0 + P_H \quad (5.20)$$

Independientemente de la fuente de la ineficiencia, si se compensan las corrientes asociadas con P_1^- , P_1^0 , y P_H se reduce el costo de la factura de energía, ya que con el instrumento de medición sólo se facturará P_1^+ .

El principio de funcionamiento de los medidores de energía reactiva es similar al principio de funcionamiento de los medidores de energía activa [118]. Con un circuito integrador se desfasa 90° el voltaje en el medidor, por lo que los medidores de energía reactiva convierten en movimiento las componentes de corriente reactiva que demanda la carga. Despreciando las pérdidas de potencia, la potencia reactiva en cada instante de tiempo que se obtiene con el instrumento de medida es:

$$Q = Q_1^+ + Q_1^- + Q_1^0 + Q_H \quad (5.21)$$

Ninguna de las componentes de Q es considerada eficiente. Para minimizar el costo de la factura de energía hay que compensar todos sus componentes.

La demanda de Q_1^+ es exclusivamente debida a la carga. La demanda de Q_1^- y Q_1^0 se debe a la existencia de corrientes reactivas desequilibradas junto con tensiones asimétricas. Los desequilibrios pueden ser ocasionados por corrientes desequilibradas o por tensiones asimétricas, por lo que establecer la responsabilidad en la demanda de Q_1^- y Q_1^0 requiere un análisis detallado.

La demanda de Q_H se debe a los armónicos presentes en el sistema eléctrico. Los armónicos pueden ser causados por cargas no lineales o tensiones distorsionadas. Las corrientes armónicas pueden causar tensiones armónicas y viceversa, por lo que establecer la responsabilidad en la demanda de Q_H también requiere de un análisis detallado.

A pesar de que en algunas ocasiones la demanda de potencia reactiva es compartida entre la empresa de energía y la carga, esta suele ser penalizada y atribuida como una potencia provocada exclusivamente por cargas ineficientes.

Los medidores de energía activa registran en cada instante la potencia activa P , mientras que los medidores de energía reactiva registran en cada instante de tiempo la potencia reactiva Q . El factor de potencia medido (P_{Fm}) es calculado en base a la medida de P y Q como sigue:

$$P_{Fm} = \frac{P}{\sqrt{P^2 + Q^2}} \quad (5.22)$$

Algunos contadores tienen incorporados filtros, en este caso, la medida de P coincide con P_1 , la medida de Q coincide con Q_1 , y el factor de potencia P_{Fm} coincide con P_{F1} .

En España, el Ministerio de Industria, Turismo y Comercio es la entidad que se encarga de regular las tarifas de energía activa y energía reactiva. En el boletín número 315 del 31 de diciembre de 2010 se establecieron las nuevas tarifas para la demanda de energía activa y energía reactiva [119]. A partir de Enero de 2010 los consumidores con un contrato superior a 15 kW, Este desde una pequeña tienda o restaurante, con máquinas de aire acondicionado, neveras, etc. hasta una gran industria donde existen motores, transformadores, etc. pueden estar sufriendo importantes incrementos en el importe de su factura eléctrica. Las tarifas para la energía activa han permanecido prácticamente constantes, mientras que las tarifas para energía reactiva han subido sustancialmente. En la tabla 5-1 se muestran las tarifas de la energía reactiva antes y después del 31 de diciembre de 2009.

P_{Fm}	€/kvar-hora 31/12/2009	€/kvar-hora 01/01/2010	INCREMENTO
$0.9 < P_{Fm} \leq 0.95$	0.000013	0.041554	319.73 %
$0.85 < P_{Fm} \leq 0.9$	0.017018	0.041554	144 %
$0.8 < P_{Fm} \leq 0.85$	0.034037	0.041554	22 %
$P_{Fm} \leq 0.8$	0.051056	0.062332	22 %

Tabla 5-1. Incremento de la energía reactiva para el año 2010

La tarifa de reactiva antes del 31/12/2009 era alta para valores de P_{Fm} menores a 0.85, mientras que era baja para valores mayores a P_{Fm} 0.85. A partir de 01/01/2010 las tarifas para la demanda de potencia reactiva se incrementaron para prácticamente todos los P_{Fm} . El cambio más importante se produce en instalaciones con P_{Fm} entre 0.9 y 0.95. Anteriormente el pago por reactiva era prácticamente nulo y con la nueva tarificación aparece un importante recargo (319.73 %). Para no sufrir importantes recargos por reactiva, este nuevo panorama obliga a gran parte de las industrias a instalar, revisar o cambiar sus actuales baterías de condensadores o utilizar a los SAPC selectivos para compensar la potencia reactiva demandada, de tal modo que el P_{Fm} siempre sea mayor a 0.95. Las nuevas tarifas para la potencia reactiva hacen que como criterio se establezca:

Las secuencias de compensación que deben ser usadas para evitar multas y minimizar al máximo el costo de la factura son aquellas que compensen en primer lugar la potencia reactiva.

5.5. Criterio 5: Minimizar las pérdidas de potencia en el sistema eléctrico de distribución.

Los sistemas de distribución están compuestos básicamente por transformadores y por redes de distribución (conductores de alimentación). Las pérdidas de potencia en los sistemas de distribución son principalmente debidas a la potencia activa que se disipa en forma de calor. Así que para calcular las pérdidas en el sistema eléctrico de distribución cada elemento debe modelarse en base a resistencias que demanden una potencia activa equivalente a las pérdidas de potencia que se producen. Estimar las pérdidas de potencia en el sistema de distribución no es una tarea simple y requiere conocer con detalle todos los elementos que lo componen (conductores, transformadores, generadores, y cargas). En el capítulo 3 se obtuvieron expresiones para determinar estas pérdidas de potencia en función de las potencias ineficientes de la carga.

La medida de las pérdidas puede realizarse si se colocan medidores de potencia activa antes y después del sistema eléctrico de distribución donde se quieren determinar las pérdidas: la diferencia entre las medidas son las pérdidas de potencia. La medida de estas pérdidas es un factor realmente importante para las empresas de distribución de energía porque les sirve para dimensionar los generadores y evaluar la eficiencia del sistema. Más sin embargo, esta medida corresponde a las pérdidas de potencia provocadas conjuntamente por las empresas de distribución de potencia y el usuario final. Estas pérdidas no sirven para determinar el responsable ni realizar algún tipo de facturación.

Lo que sí es cierto es que las pérdidas de potencia se deben evitar porque es energía que se deja de suministrar al usuario final y merma la capacidad del sistema eléctrico de distribución. Las expresiones para cuantificar las pérdidas de potencia, en el sistema de distribución y provocadas por el usuario final, fueron determinadas en el capítulo 3 (pérdidas en el cobre, pérdidas provocadas por las corrientes de Eddy, pérdidas rotacionales). Estas pérdidas, a pesar de que sus expresiones se encuentran definidas, en muchas ocasiones no se pueden calcular ya que requiere el conocimiento específico de algunos parámetros de los elementos que componen el sistema eléctrico. Sin embargo, en el capítulo 3 se determinó que se pueden expresar en términos de la corriente que circula por sus componentes. Las pérdidas de potencia en los sistemas eléctricos dependen del cuadrado de la corriente (I^2), así que la reducción de la corriente por la red eléctrica conlleva a una reducción sustancial de las pérdidas de potencia en el sistema de distribución. Como criterio de compensación se establece:

La secuencia de compensación que minimice más las pérdidas de potencia en el sistema eléctrico de distribución aprovechando mejor la potencia disponible en los sistemas eléctricos de distribución.

Como parámetro de análisis para valorar las pérdidas de potencia en el sistema de distribución se propone la corriente efectiva (I_e) de la IEEE Std. 1459-2010. La elección de I_e , para valorar dichas pérdidas, se debe a que la IEEE Std. 1459-2010 basa su cálculo en las pérdidas de potencia que provocan las corrientes que demanda la carga y que circulan por los conductores de alimentación.

En este caso, la corriente efectiva propuesta en esta tesis ($I_{e\#}$) no es adecuada para valorar las pérdidas en el sistema de distribución, ya que basa su cálculo en las corrientes que demanda la carga y no en las pérdidas de potencia sobre los conductores de alimentación. $I_{e\#}$ junto con $V_{e\#}$ sirven para determinar correctamente las potencias demandadas por la carga y dimensionar adecuadamente los equipos de compensación. A continuación se realizará el análisis de lo que representa I_e y porque puede ser usado como indicador para valorar las pérdidas de potencia en el sistema de distribución.

La corriente efectiva I_e de un sistema trifásico de cuatro hilos definida en la IEEE Std. 1459-2010 basa el cálculo en las pérdidas de potencia en los conductores del sistema de distribución:

$$3rI_e^2 = r(I_a^2 + I_b^2 + I_c^2 + I_n^2) \quad (5.23)$$

Donde r es la resistencia de los conductores de alimentación (fases y neutro). I_a, I_b, I_c son los valores rms de la corriente para las fases $a, b,$ y c respectivamente, e I_n es el valor rms de la corriente que circula por el conductor de neutro. Despejando I_e en la ecuación (5.23) se obtiene:

$$I_e = \sqrt{\frac{1}{3}(I_a^2 + I_b^2 + I_c^2 + I_n^2)} \quad (5.24)$$

La corriente efectiva I_e es proporcional a las corrientes $I_a, I_b, I_c,$ e I_n que provocan las pérdidas de potencia, por lo que puede ser usada para valorar el incremento o la disminución de las pérdidas de potencia en el sistema de distribución.

Para las cargas que demandan corriente fundamental desequilibrada, la corriente efectiva se puede expresar en términos de las componentes simétricas.

$$I_{e1} = \sqrt{(I_1^+)^2 + (I_1^-)^2 + 4(I_1^0)^2} \quad (5.25)$$

Los coeficientes que acompañan a I_1^+ e I_1^- en la ecuación (5.25) son “1”, esto se debe a que las corrientes I_1^+ e I_1^- sólo circulan por las fases $a, b,$ y c , mientras que el coeficiente que acompaña a I_1^0 es “4”, esto se debe a que I_1^0 circula por los conductores de las fases $a, b,$ y c y la corriente $3I_1^0$ circula por el conductor del neutro. Estos coeficientes dan mayor peso a la corriente I_1^0 que circula por las fases y por el neutro, por lo que, cuando sólo existen componentes de corriente fundamental, I_{e1} es el mejor parámetro para valorar las pérdidas de potencia en el sistema de distribución, aunque no sirva para cuantificar correctamente la corriente demandada por la carga.

5.6. Criterio 6: Evitar superar el límite térmico de los conductores de alimentación.

Todos los conductores de alimentación tienen un límite térmico (ampacidad) que pueden soportar. La corriente eléctrica es la causante del calentamiento de los conductores eléctricos y es directamente proporcional a la temperatura que puedan alcanzar. El conductor está constituido principalmente de dos partes: el alma conductora y su aislamiento. En general el límite térmico del conductor está impuesto por la temperatura máxima que el aislamiento pueda soportar, por la capacidad del medio para disipar el calor, y por la geometría o disposición de los conductores. A cierta temperatura de operación las características del conductor cambian de forma irreversible disminuyendo su vida útil o llevándolo a su destrucción. Para evitar superar el límite térmico de los conductores no se debe superar la corriente nominal máxima del conductor. Como criterio de compensación se establece:

La secuencia de compensación que mejor reduzca las corrientes en los conductores de alimentación minimizando el riesgo de superar su límite térmico.

La corriente nominal máxima de conductor se establece de acuerdo al método de instalación de los conductores y de las condiciones del entorno, por lo que, la corriente nominal máxima de los conductores está impuesta desde su diseño y no debe ser superada. No obstante, el incremento de la demanda y la instalación de nuevas cargas que demandan potencias ineficientes ocasionan que la corriente nominal sea superada. Con el fin de optimizar las redes eléctricas, los SAPC's selectivos pueden ser usados para controlar las corrientes que circulan por los conductores de alimentación evitando que se supere la corriente nominal máxima de diseño. Con los SAPC's selectivos se pueden monitorizar las corrientes rms I_a , I_b , I_c , e I_n y suministrar las corrientes ineficientes reduciendo la corriente que circula por las líneas y evitando que se supere el límite térmico de los conductores o utilización del conductor.

5.7. Criterio 7: Reducir la corriente del neutro.

La corriente que circula por el neutro en los sistemas eléctricos es un problema técnico del día a día que se debe resolver. Las corrientes que circulan por el neutro ocasionan:

- Que la tensión de suministro se vuelva asimétrica y se distorsione.
- c.d.t por el conductor de neutro apareciendo tensiones neutro-tierra indeseables.
- El aumento de las pérdidas de potencia en el sistema de distribución.

Las corrientes que circulan por el neutro son corrientes de secuencia cero (I_1^0 , e I_H^0) y son ocasionadas generalmente por el usuario final. La corriente I_1^0 se debe principalmente al desequilibrio de la carga, y la corriente I_H^0 es parte de la corriente no fundamental (I_H) que demandan las cargas no lineales. Por los conductores de las fases circulan I_1^0 , e I_H^0 , mientras que por el conductor de neutro estas corrientes se triplican circulando $3I_1^0$, e $3I_H^0$. Por esta razón, en muchas instalaciones eléctricas, la corriente del neutro puede ser mayor que la corriente de las fases. Las corrientes que circulan por el neutro sin control ocasionan el calentamiento y degradamiento de este conductor. El problema se agrava debido a que el conductor del neutro en muchas instalaciones fue diseñado con una sección menor que la sección de los conductores de las fases. Como criterio de compensación se establece:

La secuencia de compensación que mejor reduzca la corriente en el conductor de neutro minimizando el riesgo de que se produzcan calentamientos excesivos que provoquen su destrucción.

El SAPC selectivo puede ser configurado para compensar las corrientes del neutro. Debido que se dispone de un SAPC con un inversor de 3 ramas (ramas para las fases a , b , c), para reducir la corriente del neutro se deben compensar las corrientes I_1^0 , e I_H^0 en cada fase (a , b , c).

Para observar la reducción de la corriente del neutro como parámetro de análisis se utilizará a I_n . Con el SAPC selectivo se comprobarán las corrientes de compensación selectiva para la eliminación de la corriente del neutro planteadas en la sección 4.2.4. También se establecerá si las otras estrategias de compensación reducen la corriente del neutro.

5.8. Análisis de la prioridad en el uso de los criterios para la compensación selectiva.

En las secciones anteriores se establecieron siete posibles criterios que pueden ser usados para la compensación selectiva. La prioridad en el uso de los criterios para la compensación selectiva depende de los intereses que se tengan. Se distinguen dos grupos importantes con intereses diferentes. El primer grupo son los usuarios finales, y el segundo grupo son las empresas distribuidoras de energía u operadores de red. A continuación se ordenaran los criterios de compensación de acuerdo a los intereses de cada grupo. Estos criterios pueden ser reordenados de acuerdo a las necesidades puntuales que se tengan, más sin embargo, aquí son ordenados teniendo en cuenta los intereses generales.

5.8.1. Usuarios finales.

La prioridad del usuario final es que sus equipos funcionen correctamente y que el costo de producción o de consumo sea el más bajo posible. De acuerdo a esto, los siete criterios son enunciados de acuerdo a su prioridad como sigue:

1. Minimizar el costo de la factura eléctrica: este criterio contribuye con la reducción de los costos de producción. Los actuales contadores de energía miden energía activa y energía reactiva. La demanda de energía activa se debe principalmente a las cargas eficientes del usuario final por lo que no es compensada. La demanda de potencia reactiva se debe a la conexión de cargas ineficientes y puede ser compensadas. El aumento de hasta un 319.73 % de la facturación en energía reactiva obliga a los usuarios finales a compensar la potencia reactiva Q que demandan.
2. Mejorar la calidad de la potencia de los sistemas eléctricos: mejorar la calidad de la potencia aguas arriba de las cargas, interesa al usuario final cuando este es afectado por las cargas que él mismo conecta o las instalaciones cercanas.
3. Reducir la corriente del neutro: en muchas instalaciones eléctricas el conductor de neutro es un elemento débil del sistema. Este conductor es usualmente diseñado con una sección menor que la sección de los conductores de las fases, además si las corrientes de secuencia cero son muy elevadas puede estar sobrecargado. Para evitar su destrucción, la corriente del neutro debe ser compensada.
4. Contribuir con la estabilidad de los sistemas eléctricos: de acuerdo a este criterio el SAPC selectivo debe ser utilizado para inyectar Q_1^+ . Este criterio no es usado permanentemente y sólo es usado en condiciones transitorias cuando ocurre un hueco de tensión. Si se inyecta Q_1^+ con el SAPC se pueden evitar eventuales paros de la producción para las empresas. Evitar los paros de producción impide que haya

pérdidas de capital, para esto se debe utilizar toda la potencia del SAPC para inyectar Q_1^+ , parte de esta Q_1^+ es absorbida por la carga y la otra parte fluye hacia el sistema eléctrico donde se demanda.

5. Maximizar la potencia entregada por el SAPC: al usuario final le interesa maximizar la potencia que inyecta el SAPC, potencia por la que ha pagado y que le interesa aprovechar.
6. Evitar superar el límite térmico de los conductores de alimentación: si se superan las corrientes nominales de diseño es muy probable que las protecciones contra sobrecarga (magnetotérmicos, fusibles) de la instalación se disparen continuamente parando la producción. Si esto sucede se debe utilizar el SAPC selectivo para regular las corrientes de alimentación. Estar en una condición de sobrecarga no es una situación ideal y aunque el SAPC puede ser usado para solventarla lo mejor es empezar un estudio de ingeniería para aumentar la capacidad de las redes de alimentación.
7. Minimizar las pérdidas de potencia en el sistema eléctrico de distribución: debido a que las pérdidas de potencia del sistema eléctrico no son facturadas y son asumidas por el operador de red, minimizar las pérdidas de potencia no es un asunto que interese al usuario final.

5.8.2. Empresas distribuidoras de energía.

La prioridad de las empresas distribuidoras de energía es suministrar energía a las cargas eléctricas sin interrupciones y con pérdidas de potencia mínimas. Para evaluar los criterios de selectividad, se supondrá que los SAPC's son instalados por la empresa de energía y no por el usuario final. Los siete criterios son enunciados de acuerdo a su prioridad como sigue:

1. Contribuir con la estabilidad de los sistemas eléctricos: las empresas de energía pueden instalar SAPC's para inyectar Q_1^+ y favorecer la estabilidad de los sistemas eléctricos en caso de la ocurrencia de un hueco de tensión. Los generadores sincrónicos tienden a salirse de sincronismo cuando son usados para generar grandes cantidades de potencia reactiva, por lo que, los SAPC's pueden utilizarse en estos casos para generar reactiva y descargar un poco los generadores sincrónicos conectados. En caso de que ocurra un hueco de tensión, los SAPC's conectados a la red pueden utilizarse para inyectar reactiva y contribuir con la estabilidad de los generadores sincrónicos conectados.
2. Mejorar la calidad de la potencia de los sistemas eléctricos: compensar las potencias ineficientes con los SAPC's contribuye con el correcto funcionamiento del sistema eléctrico en general y de las cargas conectadas.
3. Reducir la corriente del neutro: al igual que sucede con las cargas eléctricas, el conductor de neutro puede ser un punto débil de la red eléctrica. Si las corrientes del

neutro no son compensadas, corrientes peligrosas de secuencia cero pueden recircular por los devanados en conexión Δ de los transformadores de distribución. Compensar la corriente del neutro interesa a las empresas de energía cuando le suministran energía a cargas monofásicas (pequeñas cargas comerciales y domiciliarias).

4. Minimizar las pérdidas de potencia en el sistema eléctrico de distribución: si las pérdidas de potencia son minimizadas, se aprovecha mejor la potencia eléctrica generada. La potencia que se ahorra minimizando las pérdidas puede ser vendida y facturada a los usuarios finales.
5. Evitar superar el límite térmico de los conductores de alimentación: el correcto funcionamiento de los sistemas eléctricos depende de sus condiciones de trabajo. Un sistema eléctrico que trabaje permanentemente a condiciones nominales es un sistema eléctrico que puede ser aprovechado al máximo durante toda su vida útil. Si el límite térmico de los conductores es superado, su vida útil disminuye sustancialmente requiriendo mantenimientos más periódicos, o en el peor de los casos la inversión adelantada de nuevas redes de distribución de energía.
6. Maximizar la potencia entregada por el SAPC: maximizar la potencia suministrada por los SAPC's interesa a las empresas, ya que a todas las empresas de energía les interesa mantener a sus equipos trabajando al máximo de eficiencia.
7. Minimizar el costo de la factura eléctrica: minimizar el costo de la factura eléctrica es un asunto que le interesa al usuario final y no a la empresa distribuidora de energía.

5.9. Conclusiones.

Cuando la potencia disponible en el SAPC es menor que el conjunto de potencias ineficientes que demanda la carga, sólo una parte de estas potencias ineficientes puede ser compensada. Para realizar la compensación, bajo estas circunstancias, se puede utilizar la compensación selectiva y escoger la secuencia de compensación que más convenga. Los criterios para realizar la compensación selectiva son:

- Maximizar la potencia entregada por el SAPC a la carga: con este criterio se pretende optimizar la transferencia de potencia desde el SAPC a la carga. Con base al factor de uso (UF), que es la relación entre la potencia que es capaz de entregar el SAPC a la carga ($S_{e\#_SAPC}$) y la potencia nominal máxima del SAPC (S_{SAPC_max}), se puede establecer la secuencia de compensación que mejor aprovecha la potencia del SAPC.
- Mejorar la calidad de la potencia de los sistemas eléctricos: para obtener el estándar más alto de calidad de la potencia, los sistemas eléctricos sólo deben suministrar a la carga P_1^+ . Para evaluar la calidad de la potencia se definió el factor de potencia total eficiente ($P_{FT\#}$). El factor $P_{FT\#}$ es la relación entre la potencia eficiente que demanda la

carga (P_1^+) y el conjunto total de potencia demandada por la carga ($S_{e\#}$). El factor $P_{FT\#}$ es un indicador global de la calidad de la potencia y puede ser usado junto con otros indicadores para identificar los fenómenos ineficientes y valorar mejor la calidad de la potencia.

- Contribuir a la estabilidad de los generadores sincrónicos y reducir el tiempo de recuperación ante la ocurrencia de un hueco de tensión: cuando ocurre un hueco de tensión es porque en algún punto del sistema eléctrico se está produciendo un cortocircuito o se está arrancando un motor de inducción de potencia elevada. Los cortocircuitos y los arranques de los motores de inducción demandan grandes cantidades de potencia reactiva, por lo que los huecos de tensión son indicadores de que el sistema eléctrico demanda grandes cantidades de Q_1^+ . Bajo estas circunstancias el procedimiento operativo 12.3 que rige para los operadores de energía eólica puede hacerse extensivo a los SAPC. En el momento que suceda un hueco de tensión, los SAPC's conectados en el sistema eléctrico deben suministrar Q_1^+ con el objetivo de contribuir con la estabilidad del sistema y de disminuir el tiempo de recuperación del hueco de tensión.
- Minimizar el costo de la factura eléctrica: a pesar de que en la IEEE Std. 1459-2010 propone unos términos de potencia que distinguen las causas y sus fuentes, actualmente la facturación de la energía en España solo contempla la medición de P y Q . El Ministerio de Industria, Turismo y Comercio con su último boletín número 315 del 31 de diciembre de 2010 estableció un incremento para todas las tarifas de potencia reactiva. El incremento más importante fue para los casos que contemplen un factor de potencia P_{Fm} entre 0.9 y 0.95 con un aumento de la tarifa de un 319.73 %. Este gran aumento obliga a los SAPC conectados a utilizar su potencia disponible en compensar principalmente Q .
- Minimizar las pérdidas de potencia en el sistema eléctrico de distribución: se eligió a la corriente efectiva (I_e) de la IEEE Std. 1459-2010 como parámetro para evaluar el incremento o disminución de las pérdidas en los sistemas eléctricos de distribución. Esto debido a que I_e es función de las pérdidas de potencia en los conductores de alimentación.
- Evaluar el límite térmico de los conductores de alimentación: el límite térmico de los conductores de alimentación viene impuesto desde su diseño por la corriente nominal máxima que pueden soportar. Los SAPC's selectivos pueden ser usados para reducir las corrientes en los conductores de alimentación y evitar que en cada conductor (fases a , b , c y neutro n) se superen las corrientes nominales máximas de diseño. Como parámetros de análisis se utilizarán las corrientes I_a , I_b , e I_c de las fases y la corriente I_n del neutro.

- Reducir la corriente del neutro: la corriente que circula por el neutro es un problema técnico que muchas empresas deben resolver. La corriente que circula por el neutro provoca serios problemas que pueden ser resueltos con el uso de los SAPC's selectivos. Con el uso de los SAPC's selectivos es posible eliminar la corriente del neutro optimizando la instalación eléctrica. Como parámetro para evaluar la variación de la corriente del neutro será usado I_n .

Se ordenaron los criterios de compensación de acuerdo a los intereses que se tienen. Para las empresas de energía es prioritario mantener todas las cargas conectadas garantizando la estabilidad de los sistemas eléctricos, mientras que para los usuarios finales es prioritario minimizar el valor de la factura eléctrica reduciendo los costos de producción.

6. Resultados de simulación.

Mediante herramientas de simulación es posible reproducir condiciones de alimentación y carga que permitan validar las propuestas desarrolladas en la presente tesis. Las características particulares elegidas para los circuitos analizados en las siguientes secciones han tenido en cuenta que los circuitos puedan ser materializados en los laboratorios de investigación disponibles, lo que permitirá contrastar los resultados de simulación con los experimentales, bajo condiciones similares de trabajo. Los objetivos de las simulaciones incluidas en esta sección son los siguientes:

- Comprobar y validar la estrategia de compensación selectiva como estrategia de compensación para cada corriente ineficiente de la carga.
- Comprobar y validar la estrategia de compensación global o estrategia de compensación G_T .
- Comprobar y validar la estrategia de compensación selectiva con limitación de potencia (Estrategias S1, S2, S3, S4, S5, y S6).
- Comprobar y validar la estrategia de compensación global modificada con limitación de potencia o estrategia de compensación G_L .
- Comprobar y validar la estrategia de compensación selectiva para la compensación de la corriente del neutro o estrategia de compensación N.
- Analizar los criterios de compensación para las estrategias de compensación cuando existe limitación de potencia en el SAPC.

El capítulo se ha estructurado de acuerdo con los objetivos planteados y en el mismo orden que el que se han presentado. Para la simulación del sistema eléctrico/electrónico se seleccionó la plataforma de simulación Matlab-Simulink. La elección de esta plataforma se sustenta en las siguientes bases:

- Facilidad de diseño de funciones definidas por el usuario (S-function) que permiten desarrollar mediante código de Matlab los algoritmos a implementar.
- Matlab-Simulink incorpora una librería para la simulación y análisis de sistemas de potencia denominada SimPowerSystems.

Las funciones definidas por el usuario permiten desarrollar el código de los algoritmos en un lenguaje de programación similar a C de forma análoga a como se haría en un procesador

digital de señal (DSP). El código generado para el desarrollo de los algoritmos incluidos para la simulación es transportable casi directamente (95%) al DSP, lo cual hace que la migración desde la simulación hacia el sistema real sea un proceso sencillo y temporalmente corto. La librería SimPowerSystems permite la simulación de sistemas eléctricos y electrónicos con modelos muy precisos. La unión de las dos características citadas hace de Matlab-Simulink una herramienta de gran potencia para la simulación de sistemas de potencia, facilitando además la portabilidad a sistemas procesadores digitales reales.

Uno de los principales problemas que plantea un sistema de simulación que corre sobre un ordenador estándar es el tiempo de simulación. Por esto la simulación consta de dos partes principales. La primera parte es la simulación de la carga que incluye elementos no lineales en la etapa de potencia. La segunda parte es la simulación del modelo del SAPC creado mediante S-functions en Matlab-Simulink.

6.1. Simulación de las corrientes de la carga.

En este apartado se explicará la simulación del sistema eléctrico utilizado para reproducir las pruebas experimentales del laboratorio. Esta carga se utilizará para evaluar todas las estrategias de compensación de este capítulo. En la figura 6-1 se presenta el modelo de simulación utilizado para obtener las tensiones de alimentación, las corrientes de carga y la corriente de neutro.

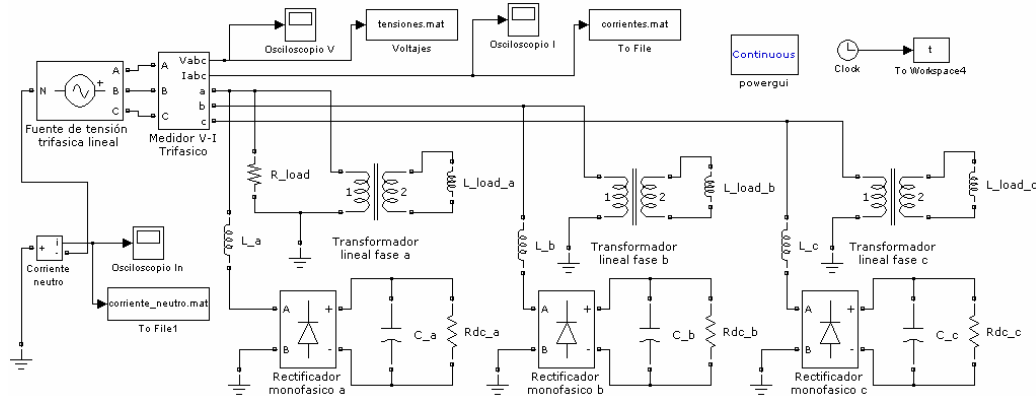


Figura 6-1. Modelo empleado para la simulación de la carga.

La tensión trifásica es senoidal, simétrica y de frecuencia fundamental. El voltaje rms línea-neutro es de 125 V. La frecuencia es de 50 Hz. La fase inicial para la fase z (α_z) es $\alpha_a=0$, $\alpha_b=240^\circ$, y $\alpha_c=120^\circ$ ($z=a,b,c$). La representación de la tensión de suministro en cada instante de tiempo y para la fase z ($v_z(t)$) puede modelarse mediante la siguiente expresión:

$$v_z(t) = \sqrt{2} \cdot 125 \text{sen}(2 \cdot \pi \cdot 50 \cdot t - \alpha_z) \quad (6.1)$$

Las formas de onda de voltaje son almacenadas en el archivo *tensiones.mat* y pueden verse en la figura 6-2.

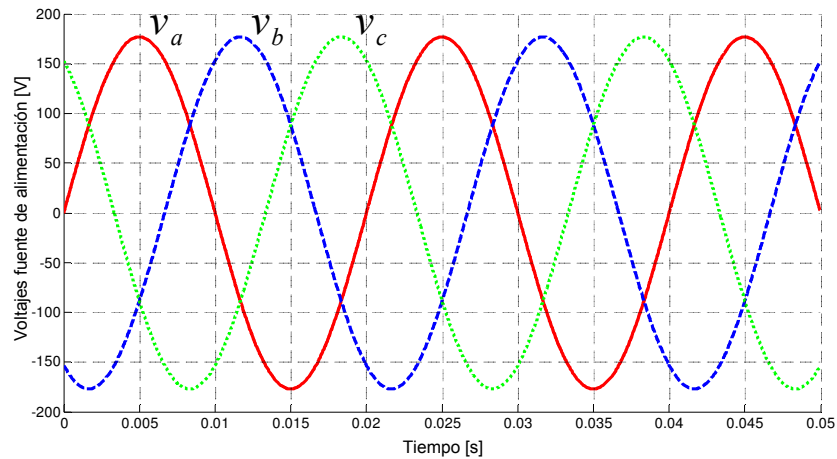


Figura 6-2. Tensiones de alimentación senoidales y equilibradas.

La carga incluye los fenómenos de desequilibrio, de desfase, y de distorsión. El desequilibrio es ocasionado principalmente por la conexión de una resistencia en la fase *a* (*R_load*). El desfase es ocasionado principalmente por la conexión de transformadores lineales con carga inductiva (*L_load_a*, *L_load_b*, *L_load_c*). La distorsión es ocasionada principalmente por la conexión de los rectificadores monofásicos con carga *R//C*. En las siguientes tablas se resumen los valores de los parámetros de la carga medidos en el laboratorio y utilizados en la simulación.

<i>°Desequilibrio (Resistencia en la fase a).</i>	
<i>R_load</i> = 65.9 Ω	

Tabla 6-1. Carga resistiva desequilibrada

<i>(Desfase) Transformador lineal.</i>		
<i>S_nominal</i> =1000 VA		<i>f</i> =50 Hz
<i>Devanado primario.</i>		
<i>V_rms</i> = 125 V	<i>r_trafo_p</i> =0.48 Ω	<i>l_trafo_p</i> =5.1 mH
<i>Devanado secundario.</i>		
<i>V_rms</i> = 24 V	<i>r_trafo_s</i> =0.49 Ω	<i>l_trafo_s</i> =5.1 mH
<i>Rama de magnetización.</i>		

$r_{trafo_m} = 24200 \Omega$		$l_{trafo_m} = 64.19 \text{ H}$
$L_{load_a} = 2.48 \text{ mH}$	$L_{load_b} = 2.48 \text{ mH}$	$L_{load_c} = 2.57 \text{ mH}$

Tabla 6-2. Carga inductiva equilibrada (Desfase).

(Distorsión) Rectificador + carga R//C.		
$L_a = 5.048 \text{ mH}$	$L_b = 5.075 \text{ mH}$	$L_c = 5.123 \text{ mH}$
$C_a = C_b = C_c = 2200 \mu F$		$R_{dc_a} = R_{dc_b} = R_{dc_c} = 100 \Omega$

Tabla 6-3. Carga no lineal (Distorsión).

Las formas de onda de las corrientes de las fases son almacenadas en el archivo *corrientes.mat*. La corriente de neutro es almacenada en el archivo *corriente_neutro.mat*. Las corrientes de las fases y la corriente de neutro pueden verse en la figura 6-3.

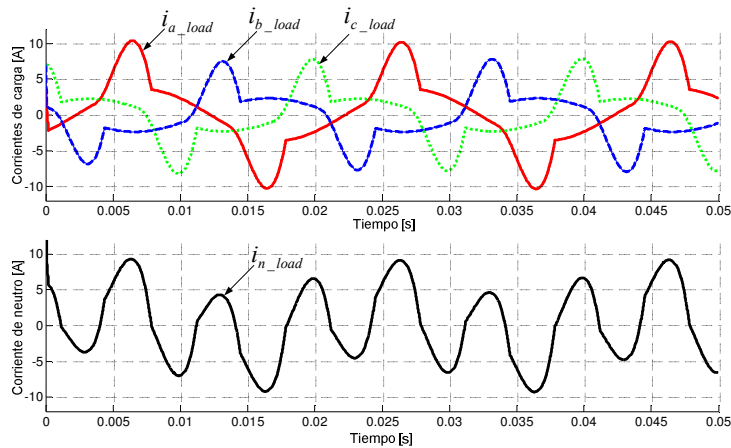


Figura 6-3. Corrientes de la carga.

Los resultados obtenidos en las simulaciones se agrupan en tablas para una mejor interpretación, para cada caso de compensación se tiene:

- Una primera tabla que incluye las magnitudes de las tensiones y sus THD_V 's, como en la tabla 6-4.
- Una segunda tabla que incluye las magnitudes de las corrientes y sus THD_I 's, como en la tabla 6-5.

- Una tercera tabla que incluye las magnitudes de las potencias, sus factores de potencia, y los términos para evaluar los criterios de compensación, como en la tabla 6-6.

$V_a = 125.02 \text{ V}$		$V_b = 125.04 \text{ V}$		$V_c = 125.04 \text{ V}$	
$V_{a1} = 125.02 \text{ V}$	$\alpha_{a1} = 0.09^\circ$	$V_{b1} = 125.04 \text{ V}$	$\alpha_{b1} = 240.01^\circ$	$V_{c1} = 125.04 \text{ V}$	$\alpha_{c1} = 119.99^\circ$
$V_1^+ = 125.03 \text{ V}$	$\alpha_1^+ = 0^\circ$	$V_1^- = 0.01 \text{ V}$	$\alpha_1^- = 180^\circ$	$V_1^0 = 0 \text{ V}$	$\alpha_1^0 = 168.69^\circ$
$V_{aH} = 0 \text{ V}$		$V_{bH} = 0 \text{ V}$		$V_{cH} = 0 \text{ V}$	
$V_{eH} = 125.03 \text{ V}$		$V_{e1H} = 125.03 \text{ V}$		$V_{eH\#} = 0 \text{ V}$	
$THD_{V_a^*} = 0 \%$		$THD_{V_b^*} = 0 \%$		$THD_{V_c^*} = 0 \%$	

Tabla 6-4. Voltajes y THD_V 's en bornes de la carga calculados mediante la propuesta de la tesis.

$I_a = 5.02 \text{ A}$		$I_b = 3.72 \text{ A}$		$I_c = 3.67 \text{ A}$		$I_n = 5.28 \text{ A}$	
$I_{a1} = 4.65 \text{ A}$	$\beta_{a1} = -31.42^\circ$	$I_{b1} = 3.2 \text{ A}$	$\beta_{b1} = 190.58^\circ$	$I_{c1} = 3.15 \text{ A}$	$\beta_{c1} = 71.1^\circ$	$I_{n1} = 1.84 \text{ A}$	$\beta_{n1} = -0.88^\circ$
$I_1^+ = 3.62 \text{ A}$	$\beta_1^+ = -41.67^\circ$	$I_1^- = 0.65 \text{ A}$	$\beta_1^- = -0.43^\circ$	$I_1^0 = 0.61 \text{ A}$	$\beta_1^0 = -0.88^\circ$		
$I_{aH} = 1.89 \text{ A}$		$I_{bH} = 1.9 \text{ A}$		$I_{cH} = 1.89 \text{ A}$		$I_{nH} = 4.95 \text{ A}$	
$I_{eH} = 4.18 \text{ A}$		$I_{e1H} = 3.73 \text{ A}$		$I_{eH\#} = 1.89 \text{ A}$			
$THD_{I_a^*} = 69.89 \%$		$THD_{I_b^*} = 70.26 \%$		$THD_{I_c^*} = 69.89 \%$		$THD_{I_n^*} = 69.89 \%$	

Tabla 6-5. Valores eficaces, desfases, y THD_I 's de las corrientes de la carga.

$S_{e\#} = 1541.70 \text{ VA}$					
$S_{e1\#} = 1383.43 \text{ VA}$			$S_{eN\#} = 680.41 \text{ VA}$		
$S_1^+ = 1342.82 \text{ VA}$		$S_{U1\#} = 332.73 \text{ VA}$	$D_{e1\#} = 680.40 \text{ VA}$	$S_{eH\#} = 0 \text{ VA}$	$D_{eV\#} = 0 \text{ VA}$
$P_1^+ = 1001.51 \text{ W}$	$Q_1^+ = 894.51 \text{ var}$				
$S_{U1V\#} = 0 \text{ VA}$	$S_{U1I\#} = 332.73 \text{ VA}$	$S_{U1U\#} = 0 \text{ VA}$	$P_H = 0 \text{ W}$	$D_{eH\#} = 0 \text{ VA}$	
$P = 1003.06 \text{ W}$	$P_1 = 1003.06$		$P_H = 0 \text{ W}$		
$P_a = 486.56 \text{ W}$	$P_b = 256.58 \text{ W}$		$P_c = 259.91 \text{ W}$		
$P_{a1} = 486.72 \text{ W}$	$P_{b1} = 256.49 \text{ W}$		$P_{c1} = 259.61 \text{ W}$		
$P_1^+ = 1001.51 \text{ W}$	$P_1^- = 0 \text{ W}$		$P_1^0 = 0 \text{ W}$		
$Q = 894.51 \text{ var}$	$Q_1 = 894.51 \text{ var}$		$Q_H = 0 \text{ var}$		
$P_{Fm} = 0.75$	$Q_1^- = 0 \text{ var}$		$Q_1^0 = 0 \text{ var}$		
$P_{F\#} = 0.65$	$P_{F1\#} = 0.72$		$P_{F1^+} = 0.75$		
$P_{FT\#} = 0.65$			$I_c = 5.05 \text{ A}$		

Tabla 6-6. Potencias, y factores de mérito en la red de suministro antes de la compensación.

Todas estas tablas han sido calculadas mediante un programa de cálculo desarrollado en Matlab-Guide a partir de los datos obtenidos de las simulaciones en Matlab-Simulink, tal como se muestra en la figura 6-4.

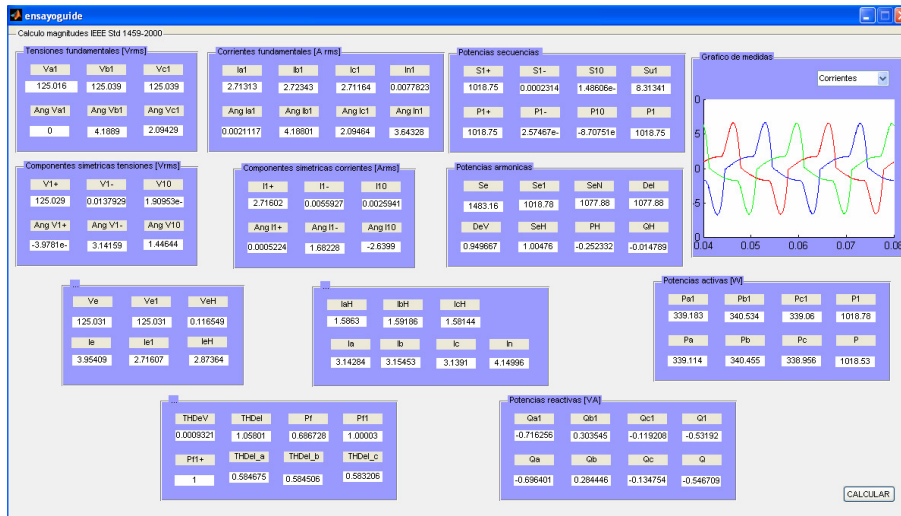


Figura 6-4. Programa de Matlab-Guide para cálculo de los resultados.

6.2. Simulación del SAPC para las corrientes de compensación y corrientes de la red.

En la figura 6-5 se presenta el modelo de simulación utilizado para obtener las corrientes de compensación y las corrientes de la red durante la compensación.

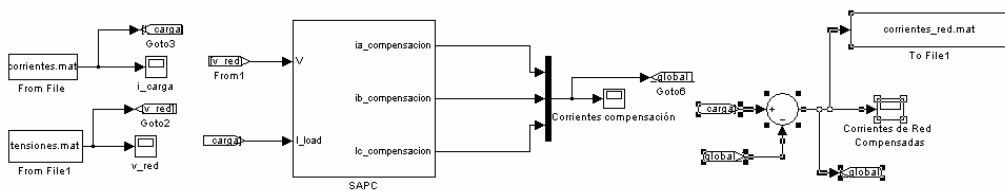


Figura 6-5. Modelo para simular el SAPC global o selectivo.

Los datos de las corrientes y tensiones de la carga provienen respectivamente de los archivos *corrientes.mat* y *tensiones.mat*. Los archivos *corrientes.mat* y *tensiones.mat* fueron obtenidos previamente de la simulación de la carga. Las corrientes de la carga son llevadas al tag “Goto3” y las tensiones al tag “Goto2”. Con los tag’s Goto3 y Goto 2, las corrientes y tensiones de la carga son llevadas al bloque que modela el SAPC. El bloque del SAPC se ha implementado mediante una *S-function* que permite crear funciones definidas por el usuario mediante la escritura del código a ejecutar un lenguaje de programación propio de Matlab basado en el estándar *Ansy C*. La función del SAPC incluye:

- La adquisición de señales.
- La obtención de las componentes fundamentales y simétricas.
- El cálculo de las corrientes de compensación para las diferentes estrategias de compensación propuestas.

El SAPC realiza el cálculo de las corrientes de compensación de acuerdo a los parámetros de configuración elegidos. Las corrientes de compensación del SAPC son llevadas al tag “Goto6”. Los parámetros de configuración del SAPC incluyen las siguientes opciones, mostradas en la figura 6-6:

- Periodo de conmutación o periodo de muestreo de las corrientes y tensiones de la carga.
- Corriente rms máxima que puede suministrar el SAPC ($I_{SAPC\text{MAX}}$).
- Habilitar la estrategia de compensación global (G_T , G_I) o habilitar la estrategia de compensación selectiva.
- En caso de habilitar la estrategia de compensación selectiva: elegir entre las diferentes secuencias de compensación (S1, S2, S3, S4, S5, S6), elegir cada potencia ineficiente de la carga (Q_1^+ , $S_{U1\#}$, y $S_{eN\#}$) para la compensación individual, elegir cualquier combinación de dos de las potencias ineficientes de la carga, y elegir la compensación de cada corriente del neutro con la estrategia de compensación N.
- Frecuencia nominal de la tensión de suministro.

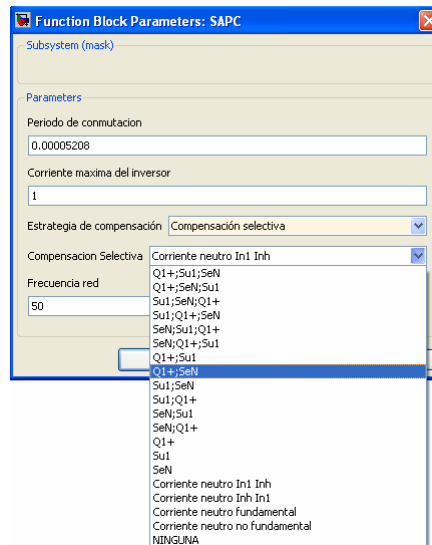


Figura 6-6. Parámetros de configuración para el bloque del SAPC en Matlab-Simulink.

Para modelar la corriente de la red se utilizó el bloque suma de simulink. La salida del bloque suma es la corriente que suministra la red eléctrica tras la compensación. Para realizar la compensación con las diferentes estrategias de compensación, la S-function utiliza los algoritmos propuestos en el capítulo 4. Se utilizará la ecuación (4.44) para seleccionar las corrientes ineficientes a compensar variando los coeficientes K_H , K_U , y K_Q de acuerdo a la estrategia de compensación elegida. La ecuación (4.44) es rescrita en la ecuación (6.2):

$$i_{z_SAPC_S} = K_H \cdot i_{zH_SAPC} + K_U \cdot i_{zU1_SAPC} + K_Q \cdot i_{z1_SAPC}^{+r} = i_{zH_SAPC_S} + i_{zU1_SAPC_S} + i_{z1_SAPC_S}^{+r} \quad (6.2)$$

A continuación se realizarán simulaciones utilizando las diferentes estrategias de compensación:

En la sección 6.2.1 se validarán las corrientes de compensación definidas en el capítulo 4, se validará la compensación para cada corriente ineficiente de la carga, se validará la compensación para dos corrientes ineficientes de la carga, y se validará la compensación para todas las corrientes ineficientes de la carga o estrategia de compensación G_T .

En la sección 6.2.2 se validarán las corrientes de compensación cuando existe limitación de potencia para las estrategias de compensación selectiva, para la estrategia de compensación G_L , y para la estrategia de compensación N.

6.2.1. Validación de las corrientes de compensación.

En esta sección se validarán mediante simulación las corrientes de compensación definidas en el capítulo 4. Se validará que el SAPC mediante los algoritmos planteados sea capaz de compensar cada potencia ineficiente, la combinación de dos potencias ineficientes, y las tres potencias ineficientes en el extendido SAPC global. Se validará que cada corriente ineficiente inyectada elimine su respectiva potencia ineficiente evitando que sea suministrada por la red eléctrica. Para todos los casos simulados que se exponen a continuación, la compensación se inicia en $t=0.02$ s tras la adquisición de las tensiones en el pcc y las corrientes en la red de suministro durante un periodo completo de la componente fundamental.

6.2.1.1. Compensación de Q_1^+ .

En esta sección se muestran los resultados obtenidos tras la conexión del SAPC cuando se decide compensar únicamente Q_1^+ . Las potencias $S_{U1\#}$ y $S_{eN\#}$ no son compensadas. De acuerdo a esto, los coeficientes de escalado para las corrientes de compensación de la ecuación (6.2) son $K_Q=1$, $K_U=0$, $K_H=0$. Las formas de onda de las corrientes de compensación que inyecta el SAPC se muestran en la figura 6-7. Las formas de onda de las corrientes que suministra la red eléctrica durante la conexión del SAPC se muestran en la figura 6-8.

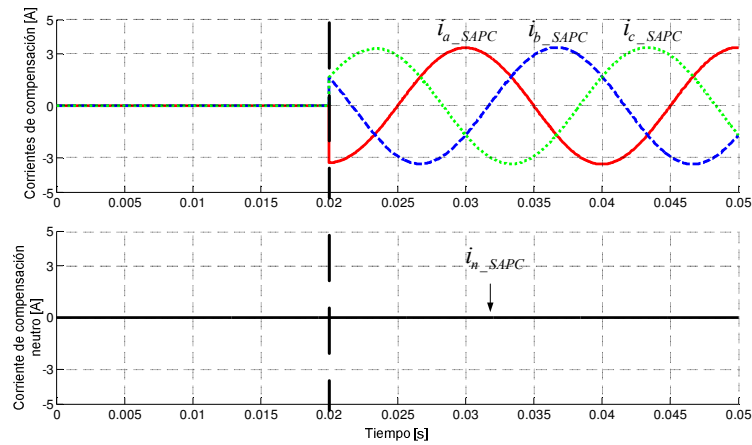


Figura 6-7. Corrientes de salida del SAPC y corriente de neutro cuando se compensa Q_1^+ .

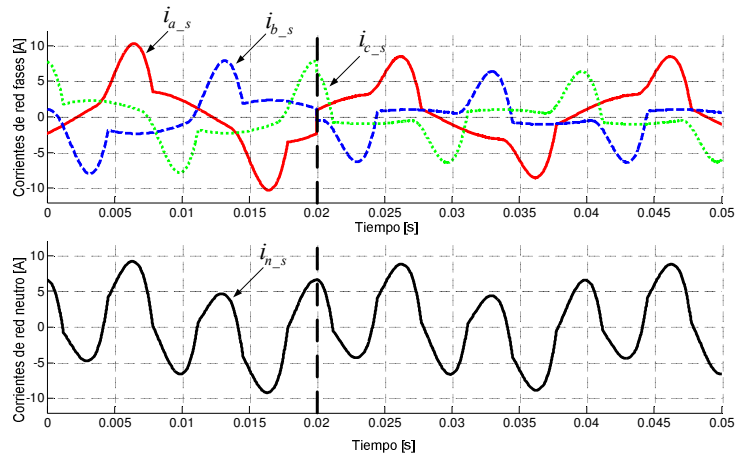


Figura 6-8. Corrientes en la red de suministro antes y durante la compensación de Q_1^+ .

Las corrientes que suministra la red eléctrica calculadas con las expresiones propuestas en la tesis se muestran en la tabla 6-7.

$I_a = 4.26 \text{ A}$		$I_b = 2.78 \text{ A}$		$I_c = 2.8 \text{ A}$		$I_n = 5.09 \text{ A}$	
$I_{a1} = 3.9 \text{ A}$	$\beta_{a1} = 0.84^\circ$	$I_{b1} = 2.06 \text{ A}$	$\beta_{b1} = 239.08^\circ$	$I_{c1} = 2.09 \text{ A}$	$\beta_{c1} = 118.49^\circ$	$I_{n1} = 1.85 \text{ A}$	$\beta_{n1} = 3.87^\circ$
$I_1^+ = 2.68 \text{ A}$	$\beta_1^+ = -0.22^\circ$	$I_1^- = 0.6 \text{ A}$	$\beta_1^- = 2.47^\circ$	$I_1^0 = 0.62 \text{ A}$	$\beta_1^0 = 3.87^\circ$		
$I_{aH} = 1.72 \text{ A}$		$I_{bH} = 1.86 \text{ A}$		$I_{cH} = 1.87 \text{ A}$		$I_{nH} = 4.74 \text{ A}$	
$I_{eH} = 3.35 \text{ A}$			$I_{e1H} = 2.82 \text{ A}$			$I_{eH\#} = 1.81 \text{ A}$	
$THD_{Ia^*} = 64.17 \%$		$THD_{Ib^*} = 69.40 \%$		$THD_{Ic^*} = 69.77 \%$		$THD_{In^*} = 67.54 \%$	

Tabla 6-7. Corrientes y THD 's de la red de suministro tras la compensación de Q_1^+ .

La tabla 6-8 presenta las magnitudes de potencia y los diferentes factores de análisis calculados a partir de los valores de las tensiones en el pcc y las corrientes suministradas por la red eléctrica durante la compensación.

$S_{e\#} = 1257.46 \text{ VA}$					
$S_{e1\#} = 1056.97 \text{ VA}$			$S_{eN\#} = 681.19 \text{ VA}$		
$S_1^+ = 1005.24 \text{ VA}$		$S_{U1\#} = 326.60 \text{ VA}$	$D_{el\#} = 681.19 \text{ VA}$	$S_{eH\#} = 0 \text{ VA}$	$D_{eV\#} = 0 \text{ VA}$
$P_1^+ = 1005.24 \text{ W}$	$Q_1^+ = 0 \text{ var}$				
$S_{UV\#} = 0 \text{ VA}$	$S_{U1\#} = 326.60 \text{ VA}$	$S_{U1U\#} = 0 \text{ VA}$	$P_H = 0 \text{ W}$		$D_{eH\#} = 0 \text{ VA}$
$P = 1006.31 \text{ W}$	$P_1 = 1006.31 \text{ W}$		$P_H = 0 \text{ W}$		
$P_a = 487.52 \text{ W}$	$P_b = 257.54 \text{ W}$		$P_c = 261.24 \text{ W}$		
$P_{a1} = 487.52 \text{ W}$	$P_{b1} = 257.54 \text{ W}$		$P_{c1} = 261.24 \text{ W}$		
$P_1^+ = 1005.23 \text{ W}$	$P_1^- = 0 \text{ W}$		$P_1^0 = 0 \text{ W}$		
$Q = 0 \text{ var}$	$Q_1 = 0 \text{ var}$		$Q_H = 0 \text{ var}$		
$P_{Fm} = 1$	$Q_1^- = 0 \text{ var}$		$Q_1^0 = 0 \text{ var}$		
$P_{F\#} = 0.8$	$P_{F1\#} = 0.95$		$P_{F1}^+ = 1$		
$P_{FT\#} = 0.8$			$I_e = 4.46 \text{ A}$		

Tabla 6-8. Potencias, y factores de mérito en la red de suministro (compensación de Q_1^+).

El SAPC genera unas corrientes ($I_{z1_SAPC}^{+r}$) para reducir en la red las corrientes reactivas demandadas por la carga, por lo que Q_1^+ es compensada. Cuando se compensa Q_1^+ , el SAPC no compensa las corrientes del neutro ya que $I_{z1_SAPC}^{+r}$ no circula por el neutro, por lo que la corriente del neutro en la red no se reduce. Tras la compensación, la potencia reactiva Q_1^+ entregada por la red de suministro es nula. Tanto $S_{eN\#}$ como $S_{U1\#}$ permanecen prácticamente inalteradas durante la compensación. Las potencias aparentes efectivas, $S_{e1\#}$ y $S_{e\#}$ se reducen gracias a que la red deja de suministrar corrientes reactivas. Los THD_I 's permanecen prácticamente iguales indicando que las corrientes no fundamentales que suministra la red no son compensadas. Con la compensación de Q_1^+ , se reducen $S_{e\#}$ y $S_{e1\#}$ por lo que $P_{F\#}$ y $P_{F1\#}$ aumentan. El factor de potencia P_{F1}^+ es 1 debido a que $P_1^+ = S_1^+$, y el factor de potencia total $P_{FT\#}$ aumenta pero no alcanza a ser 1 debido a que $S_{e\#}$, tras la compensación, aún incluye a $S_{U1\#}$ y $S_{eN\#}$.

6.2.1.2. Compensación de $S_{U1\#}$.

En esta sección se muestran los resultados obtenidos tras la conexión del SAPC cuando se decide compensar únicamente $S_{U1\#}$, las potencias Q_1^+ y $S_{eN\#}$ no son compensadas. De acuerdo a esto, los coeficientes de escalado para las corrientes de compensación de la ecuación (6.2) son $K_U=1$, $K_Q=0$, $K_H=0$. Las formas de onda de las corrientes de compensación que inyecta el SAPC se muestran en la figura 6-9 y las formas de onda de las corrientes que suministra la red eléctrica durante la conexión del SAPC se muestran en la figura 6-10.

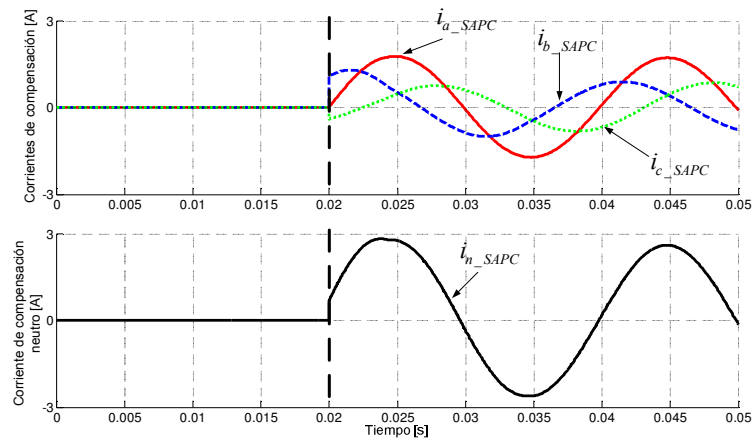


Figura 6-9. Corrientes de salida del SAPC y corriente del neutro cuando se compensa $S_{U1\#}$.

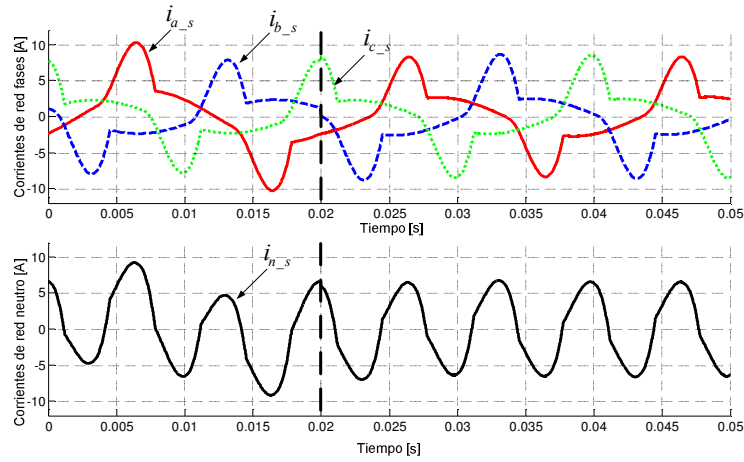


Figura 6-10. Corrientes en la red de suministro antes y durante la compensación de $S_{U1\#}$.

Las corrientes que suministra la red eléctrica calculadas con las expresiones propuestas en la tesis se muestran en la tabla 6-9.

$I_a = 3.97 \text{ A}$		$I_b = 4.09 \text{ A}$		$I_c = 4.01 \text{ A}$		$I_n = 4.76 \text{ A}$	
$I_{a1} = 3.58 \text{ A}$	$\beta_{a1} = -41.75^\circ$	$I_{b1} = 3.64 \text{ A}$	$\beta_{b1} = 198.77^\circ$	$I_{c1} = 3.55 \text{ A}$	$\beta_{c1} = 78.19^\circ$	$I_{n1} = 0.1 \text{ A}$	$\beta_{n1} = 235.32^\circ$
$I_1^+ = 3.59 \text{ A}$	$\beta_1^+ = -41.6^\circ$	$I_1^- = 0.03 \text{ A}$	$\beta_1^- = 84.33^\circ$	$I_1^0 = 0.03 \text{ A}$	$\beta_1^0 = -124.68^\circ$		
$I_{aH} = 1.72 \text{ A}$		$I_{bH} = 1.87 \text{ A}$		$I_{cH} = 1.88 \text{ A}$		$I_{nH} = 4.76 \text{ A}$	
$I_{e\#} = 4.02 \text{ A}$		$I_{e1\#} = 3.59 \text{ A}$		$I_{eH\#} = 1.81 \text{ A}$			
$THD_{Ia^*} = 64.06 \%$		$THD_{Ib^*} = 69,65 \%$		$THD_{Ic^*} = 70,02 \%$		$THD_{In^*} = 67.57 \%$	

Tabla 6-9. Corrientes y THD_I 's de la red tras la compensación de $S_{U1\#}$.

La tabla 6-10 presenta las magnitudes de potencia y los diferentes factores de análisis calculados a partir de los valores de las tensiones en el pcc y las corrientes suministradas por la red eléctrica durante la compensación.

$S_{e\#} = 1508.87 \text{ VA}$				
$S_{e1\#} = 1346.32 \text{ VA}$		$S_{eN\#} = 681.24 \text{ VA}$		
$S_1^+ = 1346.25 \text{ VA}$		$S_{U1\#} = 14.03 \text{ VA}$	$D_{el\#} = 681.24 \text{ VA}$	$S_{eH\#} = 0 \text{ VA}$
$P_1^+ = 1006.72 \text{ W}$	$Q_1^+ = 893.81 \text{ var}$			
$S_{UV\#} = 0 \text{ VA}$	$S_{U1\#} = 14.03 \text{ VA}$	$S_{U1\#} = 0 \text{ VA}$	$P_H = 0 \text{ W}$	$D_{eH\#} = 0 \text{ VA}$
$P = 1007.07 \text{ W}$	$P_1 = 1007.07 \text{ W}$		$P_H = 0 \text{ W}$	
$P_a = 333.91 \text{ W}$	$P_b = 342.30 \text{ W}$		$P_c = 330.85 \text{ W}$	
$P_{a1} = 333.91 \text{ W}$	$P_{b1} = 342.30 \text{ W}$		$P_{c1} = 330.85 \text{ W}$	
$P_1^+ = 1006.96 \text{ W}$	$P_1^- = 0 \text{ W}$		$P_1^0 = 0 \text{ W}$	
$Q = 893.81 \text{ var}$	$Q_1 = 893.81 \text{ var}$		$Q_H = 0 \text{ var}$	
$P_{Fm} = 0.75$	$Q_1^- = 0 \text{ var}$		$Q_1^0 = 0 \text{ var}$	
$P_{F\#} = 0.67$	$P_{F1\#} = 0.75$		$P_{F1}^+ = 0.75$	
$P_{FT\#} = 0.67$			$I_e = 4.87$	

Tabla 6-10. Potencias, y factores de mérito en la red de suministro (compensación de $S_{U1\#}$).

El SAPC genera unas corrientes (I_{zU1_SAPC}) para reducir en la red las corrientes de desequilibrio demandadas por la carga, por lo que $S_{U1\#}$ es compensada. Cuando se compensa $S_{U1\#}$, el SAPC reduce las corrientes de neutro fundamentales, por lo que la corriente del neutro en la red contiene sólo componentes no fundamentales. La potencia de desequilibrio fundamental $S_{U1\#}$ entregada por la red de suministro es nula. Tanto $S_{eN\#}$ como Q_1^+ permanecen prácticamente inalteradas durante la compensación. Las potencias aparentes efectivas, $S_{e1\#}$ y $S_{e\#}$ se reducen gracias a que la red eléctrica deja de suministrar corrientes de desequilibrio. La demanda de P_1^+ es la misma antes y durante la compensación, sin embargo la demanda de potencia activa por fase se equilibra tras la compensación. Los THD_I 's permanecen prácticamente iguales indicando que las corrientes no fundamentales que suministra la red no son compensadas. Con la compensación de $S_{U1\#}$, se reducen $S_{e\#}$ y $S_{e1\#}$ por lo que $P_{F\#}$ y $P_{F1\#}$ aumentan. El factor de potencia P_{F1}^+ no cambia ya que S_1^+ permanece prácticamente inalterada, y el factor de potencia total $P_{FT\#}$ aumenta ligeramente debido a que $S_{e\#}$, tras la compensación, aún incluye a Q_1^+ y $S_{eN\#}$.

6.2.1.3. Compensación de $S_{eN\#}$.

En esta sección se muestran los resultados obtenidos tras la conexión del SAPC cuando se decide compensar únicamente $S_{eN\#}$, las potencias Q_1^+ y $S_{U1\#}$ no son compensadas. De acuerdo a esto, los coeficientes de escalado para las corrientes de compensación de la ecuación (6.2) son $K_H=1$, $K_Q=0$, $K_I=0$. La compensación se inicia en el instante 0.02 s tras la medida de un periodo completo de la señal fundamental. Las formas de onda de las corrientes de compensación que inyecta el SAPC se muestran en la figura 6-11 y las formas de onda de las corrientes que suministra la red eléctrica durante la conexión del SAPC se muestran en la figura 6-12.

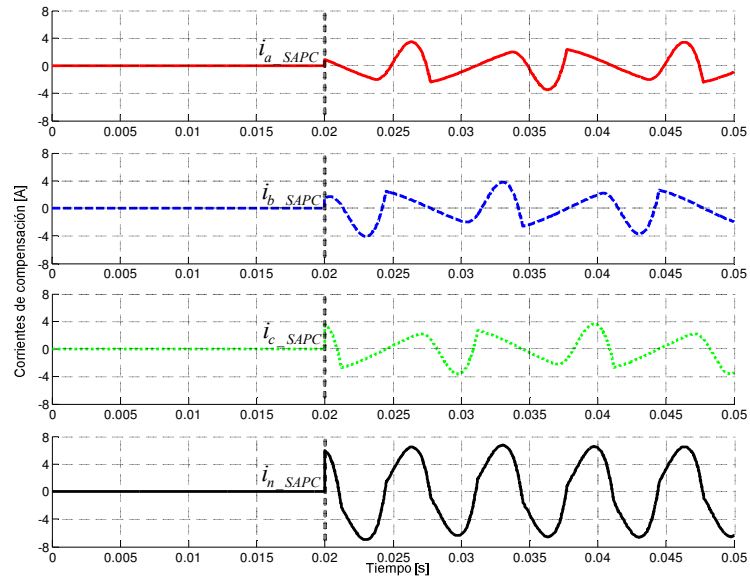


Figura 6-11. Corrientes de salida del SAPC y corriente del neutro cuando se compensa $S_{eN\#}$.

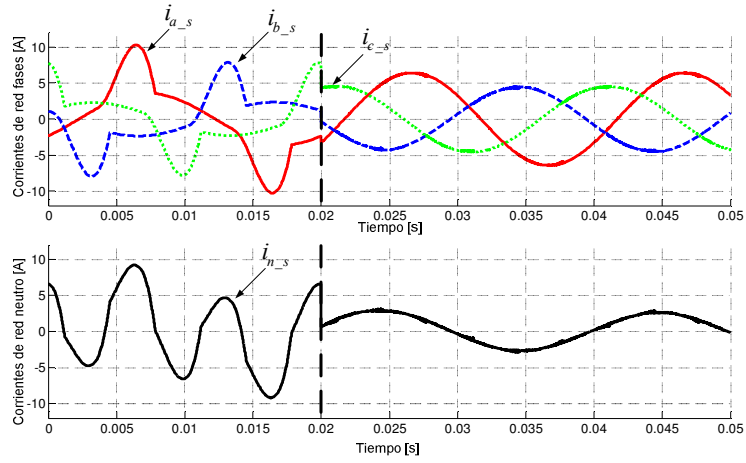


Figura 6-12. Corrientes en la red de suministro antes y durante la compensación de $S_{eN\#}$.

Las corrientes que suministra la red eléctrica calculadas con las expresiones propuestas en la tesis se muestran en la tabla 6-11.

$I_a = 4.53 \text{ A}$		$I_b = 3.1 \text{ A}$		$I_c = 3.21 \text{ A}$		$I_n = 1.91 \text{ A}$	
$I_{a1} = 4.53 \text{ A}$	$\beta_{a1} = -30.78^\circ$	$I_{b1} = 3.1 \text{ A}$	$\beta_{b1} = 189.22^\circ$	$I_{c1} = 3.21 \text{ A}$	$\beta_{c1} = 70.65^\circ$	$I_{n1} = 1.91 \text{ A}$	$\beta_{n1} = 6.4^\circ$
$I_1^+ = 3.56 \text{ A}$	$\beta_1^+ = -42.01^\circ$	$I_1^- = 0.61 \text{ A}$	$\beta_1^- = -0.48^\circ$	$I_1^0 = 0.64 \text{ A}$	$\beta_1^0 = 6.4^\circ$		
$I_{aH} = 0 \text{ A}$		$I_{bH} = 0 \text{ A}$		$I_{cH} = 0 \text{ A}$		$I_{nH} = 0 \text{ A}$	
$I_{e\#} = 3.67 \text{ A}$		$I_{e1\#} = 3.67 \text{ A}$		$I_{eH\#} = 0 \text{ A}$			
$THD_{Ia^*} = 0 \%$		$THD_{Ib^*} = 0 \%$		$THD_{Ic^*} = 0 \%$		$THD_{e\#} = 0 \%$	

Tabla 6-11. Corrientes y THD_I 's en la red de suministro tras la compensación de $S_{eN\#}$

La tabla 6-12 presenta las magnitudes de potencia y los diferentes factores de análisis calculados a partir de los valores de las tensiones en el pcc y las corrientes suministradas por la red eléctrica durante la compensación.

$S_{e\#} = 1377.06 \text{ VA}$					
$S_{e1\#} = 1377.06 \text{ VA}$			$S_{eN\#} = 0 \text{ VA}$		
$S_1^+ = 1335.32 \text{ VA}$		$S_{U1\#} = 336.48 \text{ VA}$	$D_{e1\#} = 0 \text{ VA}$	$S_{eH\#} = 0 \text{ VA}$	$D_{eV\#} = 0 \text{ VA}$
$P_1^+ = 992.18 \text{ W}$	$Q_1^+ = 893.67 \text{ var}$				
$S_{U1V\#} = 0 \text{ VA}$	$S_{U1I\#} = 336.48 \text{ VA}$	$S_{U1U\#} = 0 \text{ VA}$	$P_H = 0 \text{ W}$		$D_{eH\#} = 0 \text{ VA}$
$P = 993.13 \text{ W}$	$P_1 = 993.13 \text{ W}$	$P_H = 0 \text{ W}$			
$P_a = 486.56 \text{ W}$	$P_b = 245.09 \text{ W}$	$P_c = 261.47 \text{ W}$			
$P_{a1} = 486.56 \text{ W}$	$P_{b1} = 245.09 \text{ W}$	$P_{c1} = 261.47 \text{ W}$			
$P_1^+ = 992.18 \text{ W}$	$P_1^- = 0 \text{ W}$	$P_1^0 = 0 \text{ W}$			
$Q = 893.67 \text{ var}$	$Q_1 = 893.67 \text{ var}$	$Q_H = 0 \text{ var}$			
$P_{Fm} = 0.74$	$Q_1^- = 0 \text{ var}$	$Q_1^0 = 0 \text{ var}$			
$P_{F\#} = 0.72$	$P_{F1\#} = 0.72$	$P_{F1}^+ = 0.74$			
$P_{FT\#} = 0.72$		$I_e = 3.83 \text{ A}$			

Tabla 6-12. Potencias y factores de mérito en la red de suministro (compensación de $S_{eN\#}$).

El SAPC genera unas corrientes (I_{zH_SAPC}) para reducir en la red las corrientes no fundamentales demandadas por la carga, por lo que $S_{eN\#}$ es compensada. Cuando se compensa $S_{eN\#}$, el SAPC reduce las corrientes no fundamentales del neutro, por lo que la corriente del neutro en la red contiene sólo componentes fundamentales debido a la circulación de corriente fundamental de secuencia cero. La potencia aparente efectiva no fundamental $S_{eN\#}$ entregada por la red de suministro es prácticamente nula. Tanto Q_1^+ como $S_{U1\#}$ permanecen prácticamente inalteradas durante la compensación. La potencia aparente efectiva $S_{e\#}$ se reduce gracias a que la red deja de suministrar corrientes no fundamentales. Los THD_I 's se reducen a cero indicando que no existen componentes de corriente no fundamental en la red. Con la compensación de $S_{eN\#}$, se reduce $S_{e\#}$ por lo que $P_{F\#}$ y $P_{FT\#}$ aumentan, mientras que los factores de potencia $P_{F1\#}$ y P_{F1}^+ permanecen prácticamente iguales debido a que Q_1^+ y $S_{U1\#}$ no son compensados.

6.2.1.4. Compensación conjunta de Q_1^+ y $S_{U1\#}$.

En esta sección se muestran los resultados obtenidos tras la conexión del SAPC cuando se decide compensar Q_1^+ y $S_{U1\#}$, la potencia $S_{eN\#}$ no es compensada. De acuerdo a esto, los coeficientes de escalado para las corrientes de compensación de la ecuación (6.2) son $K_Q=1$, $K_U=1$, $K_H=0$. Las formas de onda de las corrientes de compensación que inyecta el SAPC se muestran en la figura 6-13, y las formas de onda de las corrientes que suministra la red eléctrica durante la conexión del SAPC se muestran en la figura 6-14.

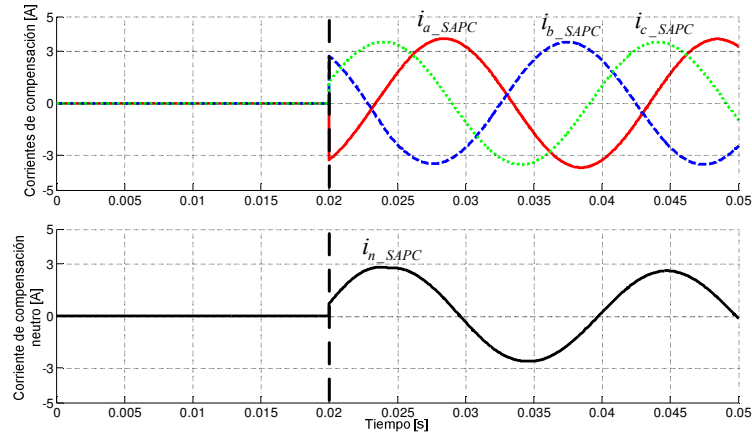


Figura 6-13. Corrientes de salida del SAPC y corriente del neutro cuando se compensa Q_1^+ y $S_{U1\#}$.

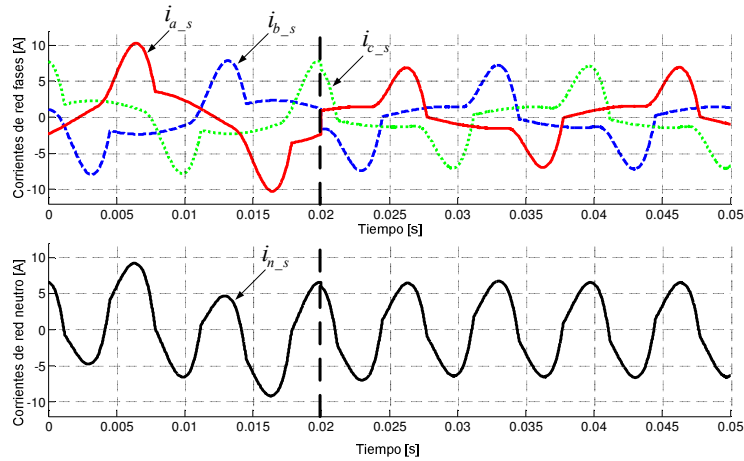


Figura 6-14. Corrientes en la red de suministro antes y durante la compensación de Q_1^+ y $S_{U1\#}$.

Las corrientes que suministra la red eléctrica, calculadas con las expresiones propuestas en la tesis, se muestran en la tabla 6-13.

$I_a = 3.18 \text{ A}$		$I_b = 3.33 \text{ A}$		$I_c = 3.25 \text{ A}$		$I_n = 4.76 \text{ A}$	
$I_{a1} = 2.67 \text{ A}$	$\beta_{a1} = -0.1^\circ$	$I_{b1} = 2.75 \text{ A}$	$\beta_{b1} = 239.6^\circ$	$I_{c1} = 2.65 \text{ A}$	$\beta_{c1} = 120.23^\circ$	$I_{n1} = 0.1 \text{ A}$	$\beta_{n1} = 235.33^\circ$
$I_1^+ = 2.69 \text{ A}$	$\beta_1^+ = -0.09^\circ$	$I_1^- = 0.03 \text{ A}$	$\beta_1^- = 93.74^\circ$	$I_1^0 = 0.03 \text{ A}$	$\beta_1^0 = -124.67^\circ$		
$I_{aH} = 1.72 \text{ A}$		$I_{bH} = 1.87 \text{ A}$		$I_{cH} = 1.87 \text{ A}$		$I_{nH} = 4.76 \text{ A}$	
$I_{e\#} = 3.25 \text{ A}$		$I_{e1\#} = 2.69 \text{ A}$		$I_{eH\#} = 1.83 \text{ A}$			
$THD_{Ia^*} = 64.41 \%$		$THD_{Ib^*} = 70.03 \%$		$THD_{Ic^*} = 70.03 \%$		$THD_{In^*} = 68.54 \%$	

Tabla 6-13. Corrientes y THD_I 's en la red eléctrica tras la compensación de Q_1^+ y $S_{U1\#}$

La tabla 6-14 presenta las magnitudes de potencia y los diferentes factores de análisis calculados a partir de los valores de las tensiones en el pcc y las corrientes suministradas por la red eléctrica durante la compensación.

$S_{e\#} = 1220.51 \text{ VA}$					
$S_{e1\#} = 1009.12 \text{ VA}$			$S_{eN\#} = 686.52 \text{ VA}$		
$S_1^+ = 1008.99 \text{ VA}$		$S_{U1\#} = 16.20 \text{ VA}$	$D_{eH\#} = 686.52 \text{ VA}$	$S_{eH\#} = 0 \text{ VA}$	$D_{eV\#} = 0 \text{ VA}$
$P_1^+ = 1008.99 \text{ W}$	$Q_1^+ = 0 \text{ var}$				
$S_{UV\#} = 0 \text{ VA}$	$S_{U1\#} = 16.20 \text{ VA}$	$S_{U1\#} = 0 \text{ VA}$	$P_H = 0 \text{ W}$	$D_{eH\#} = 0 \text{ VA}$	
$P = 1009 \text{ W}$	$P_1 = 1009 \text{ W}$	$P_H = 0 \text{ W}$			
$P_a = 333.8 \text{ W}$	$P_b = 343.85 \text{ W}$	$P_c = 331.35 \text{ W}$			
$P_{a1} = 333.8 \text{ W}$	$P_{b1} = 343.85 \text{ W}$	$P_{c1} = 331.35 \text{ W}$			
$P_1^+ = 1008.99 \text{ W}$	$P_1^- = 0 \text{ W}$	$P_1^0 = 0 \text{ W}$			
$Q = 0 \text{ var}$	$Q_1 = 0 \text{ var}$	$Q_H = 0 \text{ var}$			
$P_{Fm} = 1$	$Q_1^- = 0 \text{ var}$	$Q_1^0 = 0 \text{ var}$			
$P_{F\#} = 0.83$	$P_{F1\#} = 1$	$P_{F1}^+ = 1$			
$P_{FT\#} = 0.83$		$I_e = 4.26$			

Tabla 6-14. Potencias y factores de mérito en la red de suministro (compensación de Q_1^+ y $S_{U1\#}$).

El SAPC genera unas corrientes ($I_{z1_SAPC}^{++}$ y I_{zU1_SAPC}) para reducir en la red las corrientes reactivas y de desequilibrio demandadas por la carga, por lo que Q_1^+ y $S_{U1\#}$ son compensadas. Cuando se compensa Q_1^+ y $S_{U1\#}$, el SAPC reduce las corrientes de neutro fundamentales, por lo que la corriente del neutro en la red contiene sólo componentes no fundamentales. Las potencias Q_1^+ y $S_{U1\#}$ entregadas por la red de suministro son prácticamente nulas. La potencia $S_{eN\#}$ permanece prácticamente inalterada durante la compensación. Las potencias aparentes efectivas, $S_{e1\#}$ y $S_{e\#}$ se reducen gracias a que la red deja de suministrar corrientes reactivas y de desequilibrio. La demanda de P_1^+ es la misma antes y durante la compensación, sin embargo la demanda de potencia activa por fase se equilibra tras la compensación. Los THD_I 's permanecen prácticamente iguales indicando que las corrientes no fundamentales que suministra la red no son compensadas. Con la compensación de Q_1^+ y $S_{U1\#}$, y al no existir P_1^- y P_1^0 , se cumple que $P_1^+ = P_1 = S_1^+$ y por eso $P_{F1\#} = P_{F1}^+ = 1$. El factor de potencia $P_{F\#}$ y el factor de

potencia total $P_{FT\#}$ aumentan pero no alcanzan a ser 1, esto se debe a que $S_{e\#}$, tras la compensación, aún incluye a $S_{eN\#}$.

6.2.1.5. Compensación conjunta de $S_{U1\#}$ y $S_{eN\#}$

En esta sección se muestran los resultados obtenidos tras la conexión del SAPC cuando se decide compensar $S_{U1\#}$ y $S_{eN\#}$, la potencia Q_1^+ no es compensada. De acuerdo a esto, los coeficientes de escalado para las corrientes de compensación de la ecuación (6.2) son $K_U=1$, $K_H=1$, $K_Q=0$. Las formas de onda de las corrientes de compensación que inyecta el SAPC se muestran en la figura 6-15, y las formas de onda de las corrientes que suministra la red eléctrica durante la conexión del SAPC se muestran en la figura 6-16.

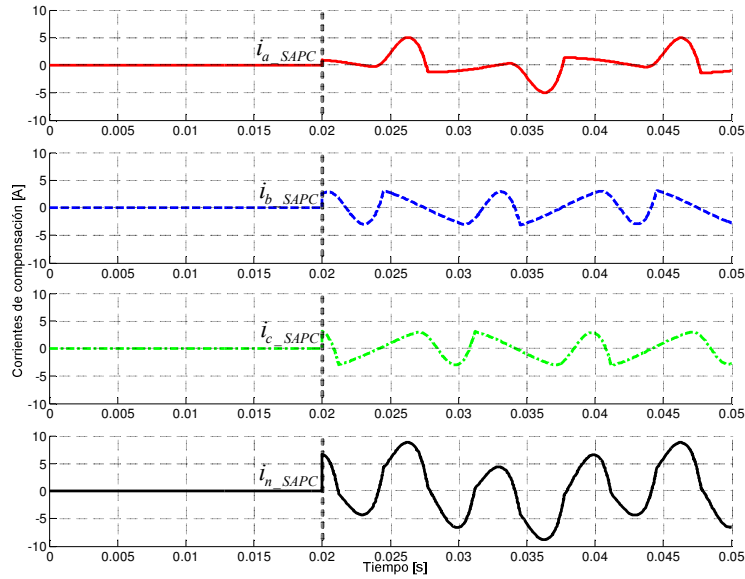


Figura 6-15. Corrientes de salida del SAPC y corriente del neutro cuando se compensa $S_{U1\#}$ y $S_{eN\#}$.

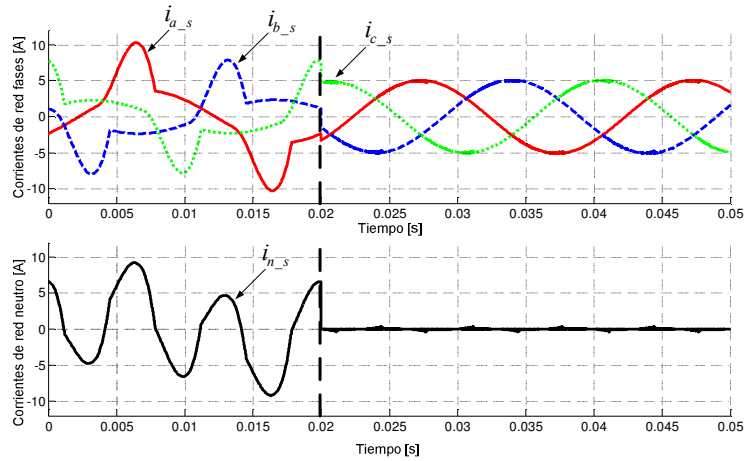


Figura 6-16. Corrientes en la red eléctrica antes y durante la compensación de $S_{U1\#}$ y $S_{eN\#}$.

La tabla 6-15 presenta las corrientes que suministra la red eléctrica tras la compensación.

$I_a = 3.57 \text{ A}$		$I_b = 3.56 \text{ A}$		$I_c = 3.56 \text{ A}$		$I_n = 0.01 \text{ A}$	
$I_{a1} = 3.57 \text{ A}$	$\beta_{a1} = -41.76^\circ$	$I_{b1} = 3.56 \text{ A}$	$\beta_{b1} = 197.97^\circ$	$I_{c1} = 3.56 \text{ A}$	$\beta_{c1} = 78.28^\circ$	$I_{n1} = 0.01 \text{ A}$	$\beta_{n1} = 94.59^\circ$
$I_1^+ = 3.56 \text{ A}$	$\beta_1^+ = -41.83^\circ$	$I_1^- = 0.03 \text{ A}$	$\beta_1^- = -22.91^\circ$	$I_1^0 = 0.02 \text{ A}$	$\beta_1^0 = 94.59^\circ$		
$I_{aH} = 0 \text{ A}$		$I_{bH} = 0 \text{ A}$		$I_{cH} = 0 \text{ A}$		$I_{nH} = 0 \text{ A}$	
$I_{e\#} = 3.56 \text{ A}$		$I_{e1\#} = 3.56 \text{ A}$		$I_{eH\#} = 0 \text{ A}$			
$THD_{Ia^*} = 0 \%$		$THD_{Ib^*} = 0 \%$		$THD_{Ic^*} = 0 \%$		$THD_{In^*} = 0 \%$	

Tabla 6-15. Corrientes y THD_I 's en la red de suministro tras la compensación de $S_{U1\#}$ y $S_{eN\#}$.

La tabla 6-16 presenta las magnitudes de potencia y los diferentes factores de análisis calculados a partir de las tensiones en el pcc y las corrientes de red de suministro.

$S_{e\#} = 1335.38 \text{ VA}$					
$S_{e1\#} = 1335.38 \text{ VA}$		$S_{eN\#} = 0 \text{ VA}$			
$S_1^+ = 1335.32 \text{ VA}$		$S_{U1\#} = 13.52 \text{ VA}$	$D_{e1\#} = 0 \text{ VA}$	$S_{eH\#} = 0 \text{ VA}$	$D_{eV\#} = 0 \text{ VA}$
$P_1^+ = 994.98 \text{ W}$	$Q_1^+ = 890.56 \text{ var}$				
$S_{UV\#} = 0 \text{ VA}$	$S_{U1\#} = 13.52 \text{ VA}$	$S_{U1\#} = 0 \text{ VA}$	$P_H = 0 \text{ W}$	$D_{eH\#} = 0 \text{ VA}$	
$P = 995.83 \text{ W}$	$P_a = 332.93 \text{ W}$	$P_b = 330.65 \text{ W}$	$P_H = 0 \text{ W}$		
$P_{a1} = 332.93 \text{ W}$	$P_{b1} = 330.65 \text{ W}$	$P_{c1} = 332.26 \text{ W}$			
$P_1^+ = 994.98 \text{ W}$	$P_1^- = 0 \text{ W}$	$P_1^0 = 0 \text{ W}$			
$Q = 890.56 \text{ var}$	$Q_1 = 890.56 \text{ var}$	$Q_H = 0 \text{ var}$			
$P_{Fm} = 0.75$	$Q_1^- = 0 \text{ var}$	$Q_1^0 = 0 \text{ var}$			
$P_{F\#} = 0.75$	$P_{F1\#} = 0.75$	$P_{F1^+} = 0.75$			
$P_{FT\#} = 0.74$		$I_e = 3.56 \text{ A}$			

Tabla 6-16. Potencias y factores de mérito en la red de suministro (compensación de $S_{U1\#}$ y $S_{eN\#}$).

El SAPC genera unas corrientes ($I_{z_{U1_SAPC}}$ y $I_{z_{H_SAPC}}$) para reducir en la red las corrientes no fundamentales y de desequilibrio fundamentales demandadas por la carga, por lo que $S_{U1\#}$ y $S_{eN\#}$ son compensadas. Cuando se compensa $S_{U1\#}$ y $S_{eN\#}$, el SAPC reduce las corrientes de neutro fundamentales y no fundamentales, la corriente del neutro en la red es reducida totalmente. Las potencias $S_{U1\#}$ y $S_{eN\#}$ entregadas por la red de suministro son prácticamente nulas. La potencia Q_1^+ permanece prácticamente inalterada durante la compensación. La potencia aparente efectiva $S_{e\#}$ se reduce en la red de suministro gracias a que el SAPC suministra a la carga $I_{z_{U1_SAPC}}$ y $I_{z_{H_SAPC}}$. La demanda de P_1^+ es la misma antes y durante la compensación, sin embargo la demanda de potencia activa por fase se equilibra tras la compensación. Los THD_I 's se reducen a cero indicando que no existen componentes de corriente no fundamental en la red. Con la compensación de $S_{U1\#}$, se reducen $S_{e\#}$ y $S_{e1\#}$ por lo que $P_{F\#}$ y $P_{F1\#}$ aumentan, el factor de potencia P_{F1}^+ no cambia ya que S_1^+ permanece inalterada, y el factor de potencia total $P_{FT\#}$ aumenta pero no llega a ser 1 debido a que $S_{e\#}$, tras la compensación, aún incluye a Q_1^+ .

6.2.1.6. Compensación conjunta de Q_1^+ y $S_{eN\#}$

En esta sección se muestran los resultados obtenidos tras la conexión del SAPC cuando se decide compensar Q_1^+ y $S_{eN\#}$, la potencia $S_{U1\#}$ no es compensada. De acuerdo a esto, los coeficientes de escalado para las corrientes de compensación de la ecuación (6.2) son $K_Q=1$, $K_H=1$, $K_I=0$. Las formas de onda de las corrientes de compensación que inyecta el SAPC se muestran en la figura 6-17. Las formas de onda de las corrientes que suministra la red eléctrica durante la conexión del SAPC se muestran en la figura 6-18.

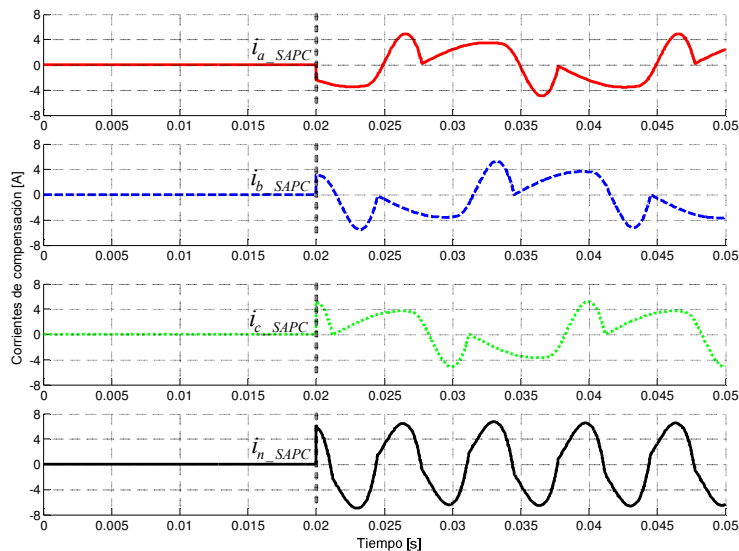


Figura 6-17. Corrientes de salida del SAPC y corriente del neutro cuando se compensa Q_1^+ y $S_{eN\#}$.

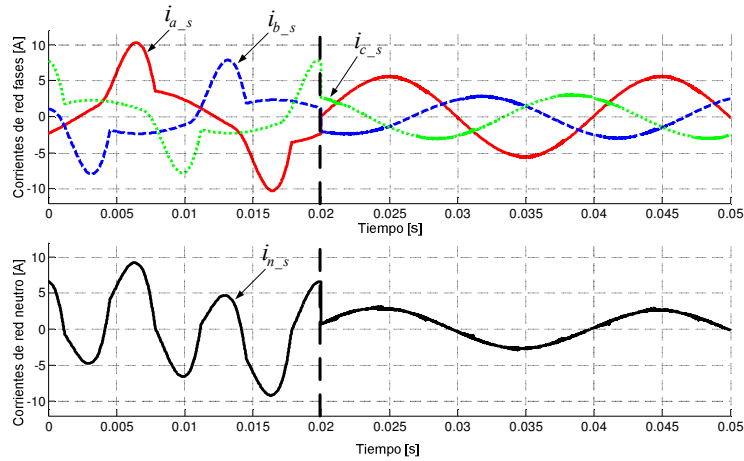


Figura 6-18. Corrientes de red antes y durante la compensación de Q_1^+ y $S_{eN\#}$.

La tabla 6-17 presenta las corrientes que suministra la red eléctrica tras la compensación.

$I_a = 3.9 \text{ A}$		$I_b = 1.97 \text{ A}$		$I_c = 2.1 \text{ A}$		$I_n = 1.91 \text{ A}$	
$I_{a1} = 3.9 \text{ A}$	$\beta_{a1} = 0.86^\circ$	$I_{b1} = 1.97 \text{ A}$	$\beta_{b1} = 239.52^\circ$	$I_{c1} = 2.1 \text{ A}$	$\beta_{c1} = 118.37^\circ$	$I_{n1} = 1.91 \text{ A}$	$\beta_{n1} = 6.4^\circ$
$I_1^+ = 2.65 \text{ A}$	$\beta_1^+ = -0.13^\circ$	$I_1^- = 0.61 \text{ A}$	$\beta_1^- = -0.62^\circ$	$I_1^0 = 0.64 \text{ A}$	$\beta_1^0 = 6.4^\circ$		
$I_{aH} = 0 \text{ A}$		$I_{bH} = 0 \text{ A}$		$I_{cH} = 0 \text{ A}$		$I_{nH} = 0 \text{ A}$	
$I_{e\#} = 2.80 \text{ A}$		$I_{e1\#} = 2.80 \text{ A}$		$I_{eH\#} = 0 \text{ A}$			
$THD_{Ia^*} = 0 \%$		$THD_{Ib^*} = 0 \%$		$THD_{Ic^*} = 0 \%$		$THD_{In^*} = 0 \%$	

Tabla 6-17. Corrientes y THD_I 's de la red tras la compensación de Q_1^+ y $S_{eN\#}$.

La tabla 6-18 presenta las magnitudes de potencia y los diferentes factores de análisis calculados a partir de las tensiones en el pcc y las corrientes suministradas por la red.

$S_{e\#} = 1049.83 \text{ VA}$					
$S_{e1\#} = 1049.83 \text{ VA}$			$S_{eN\#} = 0 \text{ VA}$		
$S_1^+ = 993.99 \text{ VA}$		$S_{U1\#} = 337.82 \text{ VA}$	$D_{e1\#} = 0 \text{ VA}$	$S_{eH\#} = 0 \text{ VA}$	$D_{eV\#} = 0 \text{ VA}$
$P_1^+ = 993.99 \text{ W}$	$Q_1^+ = 0 \text{ var}$				
$S_{UV\#} = 0 \text{ VA}$	$S_{U1\#} = 337.82 \text{ VA}$	$S_{U1\#} = 0 \text{ VA}$	$P_H = 0 \text{ W}$		$D_{eH\#} = 0 \text{ VA}$
$P = 996.32 \text{ W}$	$P_1 = 996.32 \text{ W}$		$P_H = 0 \text{ W}$		
$P_a = 487.52 \text{ W}$	$P_b = 246.32 \text{ W}$		$P_c = 262.48 \text{ W}$		
$P_{a1} = 487.52 \text{ W}$	$P_{b1} = 246.32 \text{ W}$		$P_{c1} = 262.48 \text{ W}$		
$P_{Fm} = 1$	$P_1^- = 0 \text{ W}$		$P_1^0 = 0 \text{ W}$		
$Q = 0 \text{ var}$	$Q_1 = 0 \text{ var}$		$Q_H = 0 \text{ var}$		
$Q_1^+ = 0 \text{ var}$	$Q_1^- = 0 \text{ var}$		$Q_1^0 = 0 \text{ var}$		
$P_{F\#} = 0.95$	$P_{F1\#} = 0.95$		$P_{F1^+} = 1$		
$P_{FT\#} = 0.95$			$I_e = 3.01 \text{ A}$		

Tabla 6-18. Potencias y factores de mérito en la red (compensación de Q_1^+ y $S_{eN\#}$).

El SAPC genera unas corrientes ($I_{z1_SAPC}^{+r}$ y I_{zH_SAPC}) para reducir en la red las corrientes reactivas y no fundamentales demandadas por la carga, por lo que Q_1^+ , y $S_{eN\#}$ son compensadas. Cuando se compensa $S_{eN\#}$, el SAPC reduce las corrientes no fundamentales del neutro, por esta razón, la corriente del neutro en la red contiene sólo componentes fundamentales. Tras la compensación, las potencias Q_1^+ , y $S_{eN\#}$ entregadas por la red de suministro son prácticamente nulas y la potencia $S_{U1\#}$ permanece prácticamente inalterada. Las potencias aparentes efectivas, $S_{e1\#}$ y $S_{e\#}$ se reducen en la red de suministro gracias a que el SAPC suministra a la carga ($I_{z1_SAPC}^{+r}$ y I_{zH_SAPC}). Los THD_I 's se reducen a cero indicando que no existen componentes de corriente no fundamental en la red. Con la compensación de Q_1^+ y $S_{eN\#}$, se reducen $S_{e\#}$ y $S_{e1\#}$ por lo que $P_{F\#}$ y $P_{F1\#}$ aumentan, también se cumple que $P_1^+ = S_1^+$ y por eso P_{F1}^+ es 1. El factor de potencia total $P_{FT\#}$ aumenta pero llega a ser 1 debido a que $S_{e\#}$, tras la compensación, aún incluye a $S_{U1\#}$.

6.2.1.7. Compensación conjunta de Q_1^+ , $S_{U1\#}$, y $S_{eN\#}$. Estrategia de compensación G_T .

En esta sección se muestran los resultados obtenidos tras la conexión del SAPC cuando se decide compensar todas las potencias ineficientes demandadas por la carga Q_1^+ , $S_{U1\#}$, y $S_{eN\#}$. De acuerdo a esto, los coeficientes de escalado para las corrientes de compensación de la ecuación (6.2) son $K_Q=1$, $K_U=1$, $K_H=1$. Las formas de onda de las corrientes de compensación que inyecta el SAPC se muestran en la figura 6-19. Las formas de onda de las corrientes que suministra la red durante la conexión del SAPC se muestran en la figura 6-20.

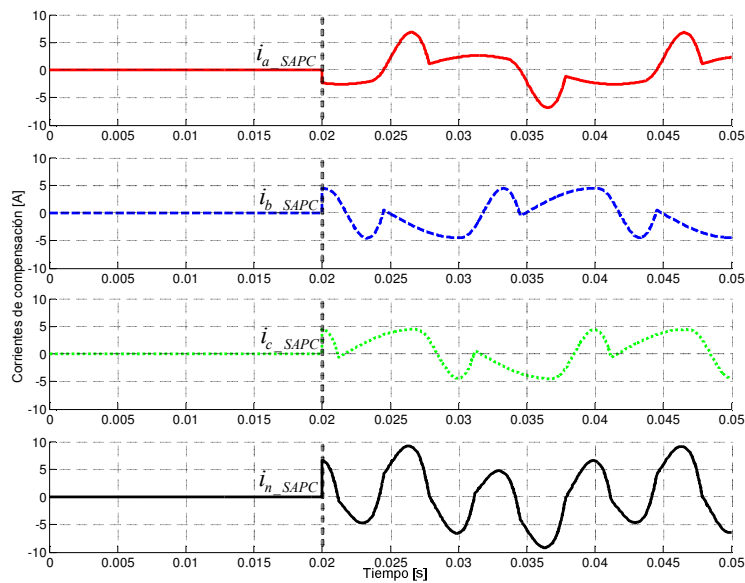


Figura 6-19. Corrientes de salida del SAPC y corriente del neutro cuando se compensa Q_1^+ , $S_{U1\#}$, y $S_{eN\#}$.

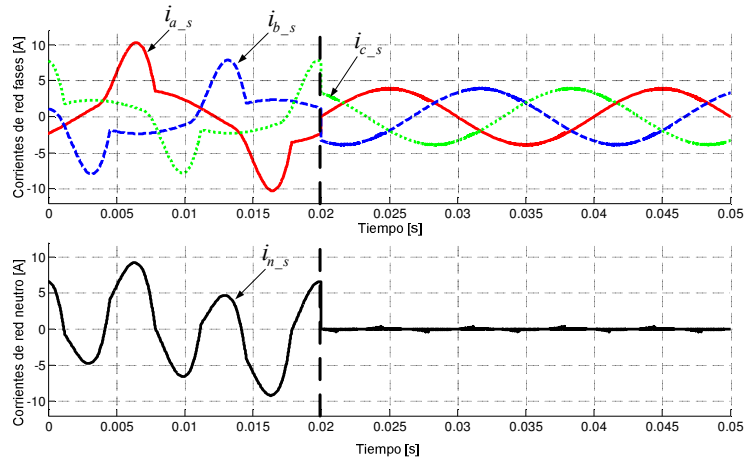


Figura 6-20. Corrientes en la red eléctrica antes y durante la compensación conjunta de Q_1^+ , $S_{U1\#}$, y $S_{eN\#}$.

La tabla 6-19 presenta las corrientes que suministra la red eléctrica tras la compensación.

$I_a = 2.67 \text{ A}$		$I_b = 2.66 \text{ A}$		$I_c = 2.67 \text{ A}$		$I_n = 0.01 \text{ A}$	
$I_{a1} = 2.67 \text{ A}$	$\beta_{a1} = -0.07^\circ$	$I_{b1} = 2.66 \text{ A}$	$\beta_{b1} = 239.94^\circ$	$I_{c1} = 2.67 \text{ A}$	$\beta_{c1} = 120.13^\circ$	$I_{n1} = 0.01 \text{ A}$	$\beta_{n1} = 94.61^\circ$
$I_1^+ = 2.66 \text{ A}$	$\beta_1^+ = 0^\circ$	$I_1^- = 0.03 \text{ A}$	$\beta_1^- = -48.65^\circ$	$I_1^0 = 0.03 \text{ A}$	$\beta_1^0 = 94.61^\circ$		
$I_{aH} = 0 \text{ A}$		$I_{bH} = 0 \text{ A}$		$I_{cH} = 0 \text{ A}$		$I_{nH} = 0 \text{ A}$	
$I_{e\#} = 2.67 \text{ A}$		$I_{e1\#} = 2.67 \text{ A}$		$I_{eH\#} = 0 \text{ A}$			
$THD_{Ia^*} = 0 \%$		$THD_{Ib^*} = 0 \%$		$THD_{Ic^*} = 0 \%$		$THD_{In^*} = 0 \%$	

Tabla 6-19. Corrientes y THD_I 's de la red de suministro tras la compensación de Q_1^+ , $S_{U1\#}$, y $S_{eN\#}$.

La tabla 6-20 presenta las magnitudes de potencia y los diferentes factores de análisis calculados a partir de las tensiones en el pcc y las corrientes de la red.

$S_{eH} = 997.86 \text{ VA}$					
$S_{e1\#} = 997.86 \text{ VA}$			$S_{eN\#} = 0 \text{ VA}$		
$S_1^+ = 997.74 \text{ VA}$		$S_{U1\#} = 15.91 \text{ VA}$	$D_{e1\#} = 0 \text{ VA}$	$S_{eH\#} = 0 \text{ VA}$	$D_{eV\#} = 0 \text{ VA}$
$P_1^+ = 997.74 \text{ W}$	$Q_1^+ = 0 \text{ var}$				
$S_{UV\#} = 0 \text{ VA}$	$S_{U1\#} = 15.91 \text{ VA}$	$S_{U1\#} = 0 \text{ VA}$	$P_H = 0 \text{ W}$		$D_{eH\#} = 0 \text{ VA}$
$P = 1000.27 \text{ W}$	$P_1 = 1000.27 \text{ W}$		$P_H = 0 \text{ W}$		
$P_a = 333.80 \text{ W}$	$P_b = 332.61 \text{ W}$		$P_c = 333.86 \text{ W}$		
$P_{a1} = 333.80 \text{ W}$	$P_{b1} = 332.61 \text{ W}$		$P_{c1} = 333.86 \text{ W}$		
$P_1^+ = 997.74 \text{ W}$	$P_1^- = 0 \text{ W}$		$P_1^0 = 0 \text{ W}$		
$Q = 0 \text{ var}$	$Q_1 = 0 \text{ var}$		$Q_H = 0 \text{ var}$		
$P_{Fm} = 1$	$Q_1^- = 0 \text{ var}$		$Q_1^0 = 0 \text{ var}$		
$P_{F\#} = 1$	$P_{F1\#} = 1$		$P_{F1^+} = 1$		
$P_{FT\#} = 1$			$I_e = 2.67 \text{ A}$		

Tabla 6-20. Potencias y factores de mérito en la red de suministro (Estrategia de compensación G_T).

El SAPC genera unas corrientes ($I_{z1_SAPC}^{++}$, I_{zU1_SAPC} , y I_{zH_SAPC}) para reducir en la red de forma global todas las corrientes ineficientes demandadas por la carga, por lo que Q_1^+ , $S_{U1\#}$, y $S_{eN\#}$ son compensadas. Cuando se compensa $S_{U1\#}$, el SAPC reduce las corrientes fundamentales del neutro, cuando se compensa $S_{eN\#}$, el SAPC reduce las corrientes no fundamentales del neutro, por lo que la corriente de neutro en la red es nula. Tras la compensación, las potencias Q_1^+ , $S_{U1\#}$ y $S_{eN\#}$ entregadas por la red de suministro son prácticamente nulas. La potencia aparente efectiva $S_{e\#}$ se reduce a su valor mínimo coincidiendo con P_1^+ . Gracias a que la red deja de suministrar corrientes no fundamentales, los THD_i 's se reducen a cero indicando que no existen componentes de corriente no fundamental en la red. Con la compensación, la única potencia que suministra la red es P_1^+ , por lo que todos los factores de potencia son 1.

6.2.2. SAPC's con limitación de potencia.

En esta sección se validarán los algoritmos para SAPC's con limitación de potencia propuestos en el capítulo 4 de la tesis. Para esto se le ha impuesto un límite de 3 A rms (4.24 A_{pico}) a las corrientes de compensación del SAPC. Se validará el algoritmo de escalado para la compensación con las 6 secuencias de compensación selectiva. Se validará el algoritmo correspondiente a la compensación global modificada con limitación de potencia G_L , así como el algoritmo para la compensación de la corriente de neutro N. Al final de la sección, se compararán todas las estrategias de compensación y se establecerá la estrategia de compensación que, para esta carga, más le conviene al usuario final y a la empresa distribuidora de energía.

6.2.2.1. Compensación de las potencias ineficientes de la carga usando la estrategia de compensación selectiva S1 ($S_{eN\#}$, $S_{U1\#}$, Q_1^+).

En esta sección se muestran los resultados obtenidos cuando se decide compensar de forma selectiva las potencias ineficientes de la carga usando la secuencia de compensación S1 ($S_{eN\#}$, $S_{U1\#}$, Q_1^+). De acuerdo a la secuencia de compensación elegida y siguiendo el método propuesto en el apartado 4.4.2 para el cálculo de los coeficientes, los coeficientes de escalado son $K_H=1$, $K_U=0.51$, y $K_Q=0$. Las formas de onda de las corrientes de compensación que inyecta el SAPC se muestran en la figura 6-21. Las formas de onda de las corrientes que suministra la red eléctrica durante la conexión del SAPC se muestran en la figura 6-22.

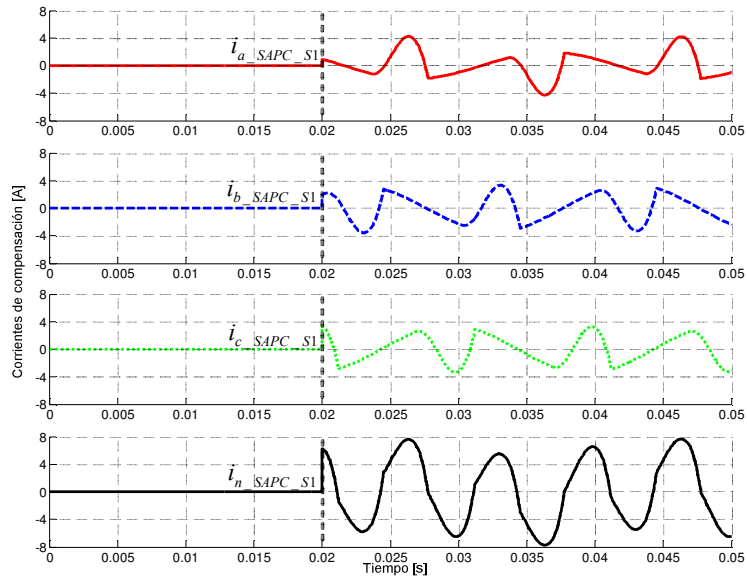


Figura 6-21. Corrientes de salida del SAPC y corriente del neutro usando la estrategia de compensación S1.

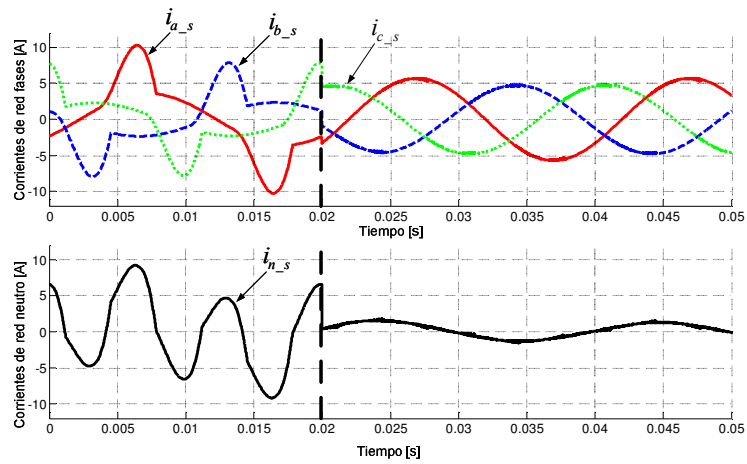


Figura 6-22. Corrientes en la red de suministro antes y durante la compensación con la estrategia S1.

Las corrientes que suministra la red eléctrica calculadas con las expresiones propuestas en la tesis se muestran en la tabla 6-21.

$I_a = 4.02 \text{ A}$		$I_b = 3.32 \text{ A}$		$I_c = 3.38 \text{ A}$		$I_n = 0.94 \text{ A}$	
$I_{a1} = 4.02 \text{ A}$	$\beta_{a1} = -35.63^\circ$	$I_{b1} = 3.32 \text{ A}$	$\beta_{b1} = 193.93^\circ$	$I_{c1} = 3.38 \text{ A}$	$\beta_{c1} = 74.76^\circ$	$I_{n1} = 0.94 \text{ A}$	$\beta_{n1} = 7.26^\circ$
$I_1^+ = 3.56 \text{ A}$	$\beta_1^+ = -41.9^\circ$	$I_1^- = 0.31 \text{ A}$	$\beta_1^- = -1^\circ$	$I_1^0 = 0.31 \text{ A}$	$\beta_1^0 = 7.26^\circ$		
$I_{aH} = 0 \text{ A}$		$I_{bH} = 0 \text{ A}$		$I_{cH} = 0 \text{ A}$		$I_{nH} = 0 \text{ A}$	
$I_{e\#} = 3.59 \text{ A}$		$I_{e1\#} = 3.59 \text{ A}$		$I_{eH\#} = 0 \text{ A}$			
$THD_{Ia^*} = 0 \%$		$THD_{Ib^*} = 0 \%$		$THD_{Ic^*} = 0 \%$		$THD_{e\#} = 0 \%$	

Tabla 6-21. Corrientes y THD_I 's de la red tras la compensación selectiva S1.

La tabla 6-22 presenta las magnitudes de potencia y los diferentes factores de análisis calculados a partir de los valores de las tensiones en el pcc y las corrientes suministradas por la red eléctrica durante la compensación.

$S_{e\#} = 1345.58 \text{ VA}$					
$S_{e1\#} = 1345.58 \text{ VA}$			$S_{eN\#} = 0 \text{ VA}$		
$S_1^+ = 1335.32 \text{ VA}$		$S_{U1\#} = 165.83 \text{ VA}$	$D_{e1\#} = 0 \text{ VA}$	$S_{eH\#} = 0 \text{ VA}$	$D_{eV\#} = 0 \text{ VA}$
$P_1^+ = 993.89 \text{ W}$	$Q_1^+ = 891.77 \text{ var}$				
$S_{UV\#} = 0 \text{ VA}$	$S_{U1\#} = 165.83 \text{ VA}$	$S_{U1U\#} = 0 \text{ VA}$	$P_H = 0 \text{ W}$	$D_{eH\#} = 0 \text{ VA}$	
$P = 994.10 \text{ W}$	$P_1 = 994.10 \text{ W}$	$P_H = 0 \text{ W}$			
$P_a = 408.50 \text{ W}$	$P_b = 288.01 \text{ W}$	$P_c = 297.59 \text{ W}$			
$P_{a1} = 408.50 \text{ W}$	$P_{b1} = 288.01 \text{ W}$	$P_{c1} = 297.59 \text{ W}$			
$P_1^+ = 994.22 \text{ W}$	$P_1^- = 0.01 \text{ W}$	$P_1^0 = 0 \text{ W}$			
$Q = 891.77 \text{ var}$	$Q_1 = 891.77 \text{ var}$	$Q_H = 0 \text{ var}$			
$P_{Fm} = 0.74$	$Q_1^- = 0 \text{ var}$	$Q_1^0 = 0 \text{ var}$			
$P_{F\#} = 0.73$	$P_{F1\#} = 0.74$	$P_{F1}^+ = 0.74$			
$P_{FT\#} = 0.74$	$UF = 0.63$	$I_e = 3.63 \text{ A}$			

Tabla 6-22. Potencias y factores de mérito en la red de suministro (compensación S1).

El SAPC genera las corrientes de compensación (I_{zH_SAPC} y I_{zU1_SAPC}) para reducir las corrientes de desequilibrio y de distorsión demandadas por la carga. La corriente I_{zH_SAPC} es inyectada totalmente a la carga debido a que $K_H=1$, mientras que las corrientes I_{zU1_SAPC} es inyectada parcialmente a la carga debido a que $K_U=0.51$. La corriente no fundamental que circula por el neutro se reduce totalmente, mientras que la corriente fundamental que circula por el neutro sólo se compensa parcialmente. Tras la compensación, la corriente efectiva $I_{e\#}$ de la red es reducida.

La potencia $S_{eN\#}$ es totalmente compensada, la potencia $S_{U1\#}$ es parcialmente eliminada, y la potencia Q_1^+ no es compensada, y $S_{e\#}$ es reducida. Gracias a que la red eléctrica deja de suministrar corriente no fundamental, los THD_I 's se reducen a cero indicando que no existen componentes de corriente no fundamental en la red. Debido a que Q_1^+ no es compensada los

factores de potencia $P_{F1\#}$ y P_{F1}^+ permanecen inalterados. El factor de potencia $P_{F\#}$ y el factor de potencia total $P_{FT\#}$ aumentan debido a la disminución de $S_{e\#}$.

6.2.2.2. Compensación de las potencias ineficientes de la carga usando la estrategia de compensación selectiva S2 ($S_{eN\#}$, Q_1^+ , $S_{U1\#}$).

En esta sección se muestran los resultados obtenidos cuando se decide compensar de forma selectiva las potencias ineficientes de la carga usando la secuencia de compensación S2 ($S_{eN\#}$, Q_1^+ , $S_{U1\#}$). De acuerdo a la secuencia de compensación elegida y siguiendo el método propuesto en el apartado 4.4.2 para el cálculo de los coeficientes, los coeficientes de escalado son $K_H=1$, $K_Q=0.39$, y $K_U=0$. Las formas de onda de las corrientes de compensación que inyecta el SAPC se muestran en la figura 6-23. Las formas de onda de las corrientes que suministra la red eléctrica durante la conexión del SAPC se muestran en la figura 6-24.

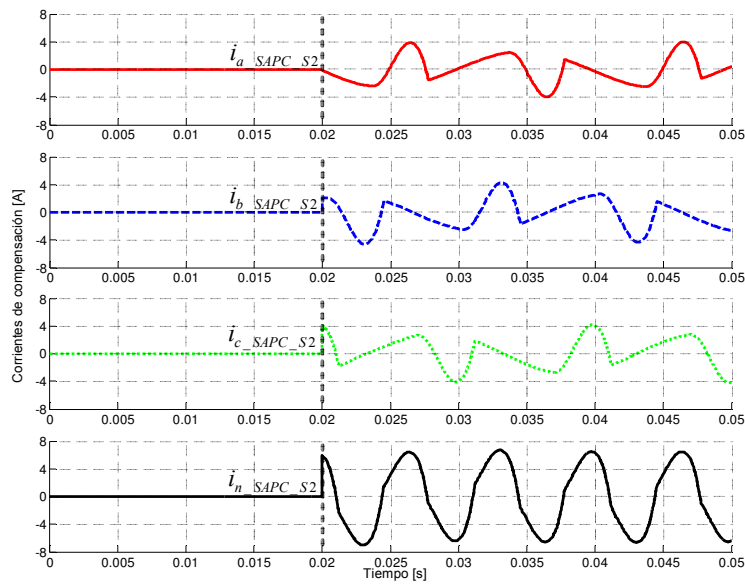


Figura 6-23. Corrientes de salida del SAPC y corriente del neutro usando estrategia de compensación S2.

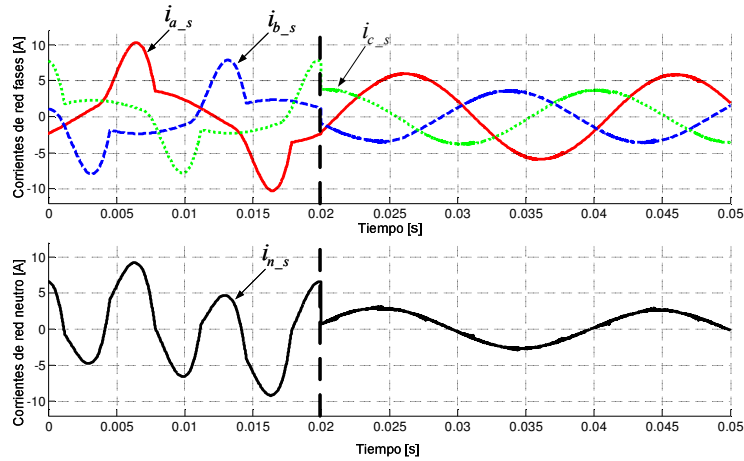


Figura 6-24. Corrientes en la red de suministro antes y durante la compensación con la estrategia S2.

La tabla 6-23 presenta las corrientes que suministra la red eléctrica tras la compensación.

$I_a = 4.15 \text{ A}$		$I_b = 2.48 \text{ A}$		$I_c = 2.61 \text{ A}$		$I_n = 1.91 \text{ A}$	
$I_{a1} = 4.15 \text{ A}$	$\beta_{a1} = -20.3^\circ$	$I_{b1} = 2.48 \text{ A}$	$\beta_{b1} = 202.26^\circ$	$I_{c1} = 2.61 \text{ A}$	$\beta_{c1} = 83.39^\circ$	$I_{n1} = 1.91 \text{ A}$	$\beta_{n1} = 6.4^\circ$
$I_1^+ = 3.05 \text{ A}$	$\beta_1^+ = -29.6^\circ$	$I_1^- = 0.61 \text{ A}$	$\beta_1^- = -0.6^\circ$	$I_1^0 = 0.64 \text{ A}$	$\beta_1^0 = 6.4^\circ$		
$I_{aH} = 0 \text{ A}$		$I_{bH} = 0 \text{ A}$		$I_{cH} = 0 \text{ A}$		$I_{nH} = 0 \text{ A}$	
$I_e = 3.17 \text{ A}$		$I_{e1} = 3.17 \text{ A}$		$I_{eH} = 0 \text{ A}$			
$THD_{Ia^*} = 0 \%$		$THD_{Ib^*} = 0 \%$		$THD_{Ic^*} = 0 \%$		$THD_{In^*} = 0 \%$	

Tabla 6-23. Corrientes y THD_i 's de la red de suministro tras la compensación selectiva S2.

La tabla 6-24 presenta las magnitudes de potencia y los diferentes factores de análisis calculados a partir de las tensiones en el pcc y las corrientes de la red eléctrica.

$S_{e\#} = 1189.79 \text{ VA}$					
$S_{e1\#} = 1189.79 \text{ VA}$			$S_{eN\#} = 0 \text{ VA}$		
$S_1^+ = 1144.02 \text{ VA}$		$S_{U1\#} = 326.82 \text{ VA}$	$D_{e1\#} = 0 \text{ VA}$	$S_{eH\#} = 0 \text{ VA}$	$D_{eV\#} = 0 \text{ VA}$
$P_1^+ = 994.72 \text{ W}$	$Q_1^+ = 565.08 \text{ var}$				
$S_{UV\#} = 0 \text{ VA}$	$S_{U1\#} = 326.82 \text{ VA}$	$S_{U1\#} = 0 \text{ VA}$	$P_H = 0 \text{ W}$		$D_{eH\#} = 0 \text{ VA}$
$P = 993.8 \text{ W}$	$P_1 = 993.8 \text{ W}$		$P_H = 0 \text{ W}$		
$P_a = 486.61 \text{ W}$	$P_b = 245.23 \text{ W}$		$P_c = 261.96 \text{ W}$		
$P_{a1} = 486.61 \text{ W}$	$P_{b1} = 245.23 \text{ W}$		$P_{c1} = 261.96 \text{ W}$		
$P_1^+ = 994.72 \text{ W}$	$P_1^- = 0 \text{ W}$		$P_1^0 = 0 \text{ W}$		
$Q = 565.08 \text{ var}$	$Q_1 = 565.08 \text{ var}$		$Q_H = 0 \text{ var}$		
$P_{Fm} = 0.87$	$Q_1^- = 0 \text{ var}$		$Q_1^0 = 0 \text{ var}$		
$P_{F\#} = 0.84$	$P_{F1\#} = 0.84$		$P_{F1^+} = 0.87$		
$P_{FT\#} = 0.84$	$UF = 0.69$		$I_e = 3.36 \text{ A}$		

Tabla 6-24. Potencias y factores de mérito en la red de suministro (compensación S2).

El SAPC genera las corrientes de compensación para reducir las corrientes de desfase, y de distorsión ($I_{z1_SAPC}^{+r}$, e I_{zH_SAPC}) demandadas por la carga. La corriente I_{zH_SAPC} es inyectada totalmente a la carga debido a que $K_H=1$, y la corriente $I_{z1_SAPC}^{+r}$ es inyectada parcialmente a la carga debido a que $K_Q=0.39$. La corriente no fundamental que circula por el neutro se compensa totalmente, mientras que la componente fundamental de la corriente que circula por el neutro no es compensada. Tras la compensación la corriente efectiva $I_{e\#}$ de la red es reducida.

La potencia $S_{eN\#}$ es totalmente compensada, la potencia Q_1^+ es parcialmente eliminada, y la potencia $S_{U1\#}$ no es compensada, y $S_{e\#}$ es reducida. Gracias a que la red eléctrica deja de suministrar corriente no fundamental, los THD_i 's se reducen a cero indicando que no existen componentes de corriente no fundamental en la red. Debido a que Q_1^+ es compensada parcialmente los factores de potencia $P_{F1\#}$ y P_{F1}^+ aumentan pero no llegan a ser 1. El factor de potencia $P_{F\#}$ y el factor de potencia total $P_{FT\#}$ aumentan debido a la disminución de $S_{e\#}$.

6.2.2.3. Compensación de las potencias ineficientes de la carga usando la estrategia de compensación selectiva S3 ($S_{U1\#}$, $S_{eN\#}$, Q_1^+).

En esta sección se muestran los resultados obtenidos cuando se decide compensar de forma selectiva las potencias ineficientes de la carga usando la secuencia de compensación S3 ($S_{U1\#}$, $S_{eN\#}$, Q_1^+). De acuerdo a la secuencia de compensación elegida y siguiendo el método propuesto en el apartado 4.4.2 para el cálculo de los coeficientes, los coeficientes de escalado son $K_U=1$, $K_H=0.78$, y $K_Q=0$. Las formas de onda de las corrientes de compensación que inyecta el SAPC se muestran en la figura 6-25.

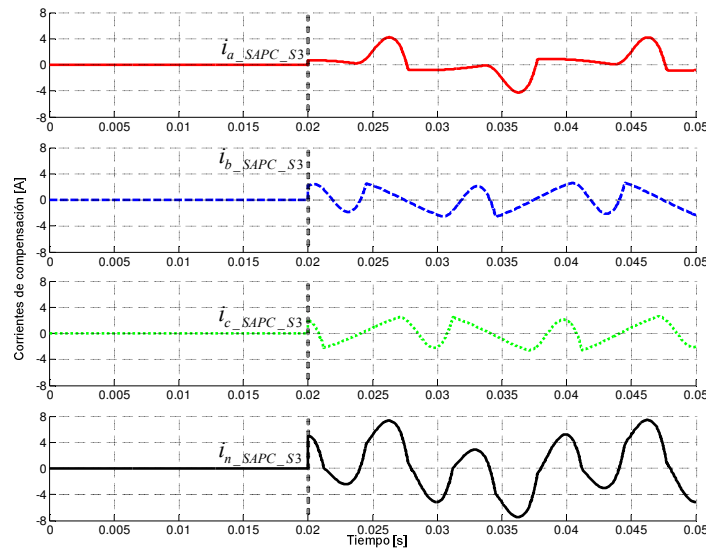


Figura 6-25. Corrientes de salida del SAPC y corriente del neutro usando la estrategia de compensación S3.

Las formas de onda de las corrientes que suministra la red eléctrica durante la conexión del SAPC se muestran en la figura 6-26.

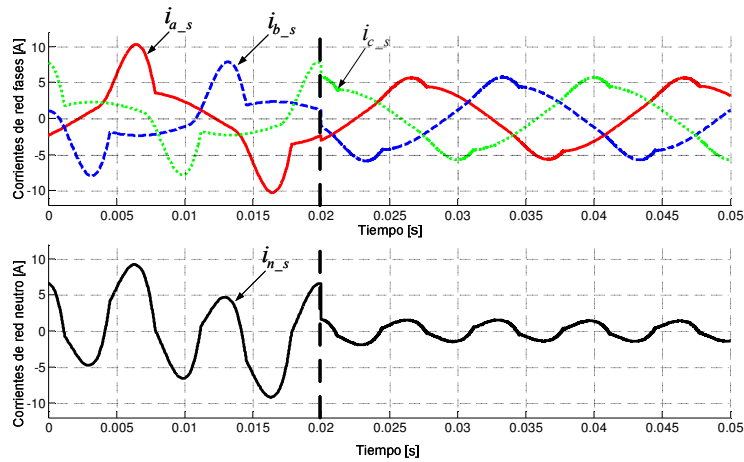


Figura 6-26. Corrientes en la red eléctrica antes y durante la compensación con la estrategia S3.

La tabla 6-25 presenta las magnitudes de potencia y los diferentes factores de análisis calculados a partir de los valores de las tensiones en el pcc y las corrientes suministradas por la red eléctrica durante la compensación.

$S_{e\#} = 1346.59 \text{ VA}$					
$S_{e1\#} = 1339.09 \text{ VA}$		$S_{eN\#} = 141.94 \text{ VA}$			
$S_1^+ = 1339.07 \text{ VA}$		$S_{U1\#} = 6.13 \text{ VA}$	$D_{el\#} = 141.94 \text{ VA}$	$S_{eH\#} = 0 \text{ VA}$	$D_{eV\#} = 0 \text{ VA}$
$P_1^+ = 998.71 \text{ W}$	$Q_1^+ = 892.01 \text{ var}$				
$S_{UV\#} = 0 \text{ VA}$	$S_{UU\#} = 6.13 \text{ VA}$	$S_{UU\#} = 0 \text{ VA}$	$P_H = 0 \text{ W}$		$D_{eH\#} = 0 \text{ VA}$
$P = 998.68 \text{ W}$	$P_1 = 998.68 \text{ W}$	$P_H = 0 \text{ W}$			
$P_a = 332.46 \text{ W}$	$P_b = 334.58 \text{ W}$	$P_c = 331.63 \text{ W}$			
$P_{a1} = 332.46 \text{ W}$	$P_{b1} = 334.58 \text{ W}$	$P_{c1} = 331.63 \text{ W}$			
$P_1^+ = 998.71 \text{ W}$	$P_1^- = 0 \text{ W}$	$P_1^0 = 0 \text{ W}$			
$Q = 892.01 \text{ var}$	$Q_1 = 892.01 \text{ var}$	$Q_H = 0 \text{ var}$			
$P_{Fm} = 0.75$	$Q_1^- = 0 \text{ var}$	$Q_1^0 = 0 \text{ var}$			
$P_{F\#} = 0.74$	$P_{F1\#} = 0.75$	$P_{F1}^+ = 0.75$			
$P_{FT\#} = 0.74$	$UF = 0.56$	$I_e = 3.64 \text{ A}$			

Tabla 6-25. Potencias y factores de mérito en la red de suministro (compensación S3).

Las corrientes que suministra la red eléctrica calculadas con las expresiones propuestas en la tesis se muestran en la tabla 6-26.

$I_a = 3.59 \text{ A}$		$I_b = 3.61 \text{ A}$		$I_c = 3.57 \text{ A}$		$I_n = 1.07 \text{ A}$	
$I_{a1} = 3.57 \text{ A}$	$\beta_{a1} = -41.85^\circ$	$I_{b1} = 3.59 \text{ A}$	$\beta_{b1} = 198.19^\circ$	$I_{c1} = 3.55 \text{ A}$	$\beta_{c1} = 78.34^\circ$	$I_{n1} = 0.04 \text{ A}$	$\beta_{n1} = 218.93^\circ$
$I_1^+ = 3.57 \text{ A}$	$\beta_1^+ = -41.77^\circ$	$I_1^- = 0.01 \text{ A}$	$\beta_1^- = 27.52^\circ$	$I_1^0 = 0.01 \text{ A}$	$\beta_1^0 = -141.07^\circ$		
$I_{aH} = 0.33 \text{ A}$		$I_{bH} = 0.37 \text{ A}$		$I_{cH} = 0.37 \text{ A}$		$I_{nH} = 1.07 \text{ A}$	
$I_{e\#} = 3.59 \text{ A}$		$I_{e1\#} = 3.57 \text{ A}$		$I_{eH\#} = 0.38 \text{ A}$			
$THD_{Ia^*} = 12.41 \%$		$THD_{Ib^*} = 13.91 \%$		$THD_{Ic^*} = 13.91 \%$		$THD_{In^*} = 14.28 \%$	

Tabla 6-26. Corrientes y THD_I 's de la red de suministro tras la compensación selectiva S3.

El SAPC genera las corrientes de compensación para reducir las corrientes de desequilibrio y de distorsión (I_{zU1_SAPC} e I_{zH_SAPC}) demandadas por la carga. La corriente I_{zU1_SAPC} es inyectada totalmente a la carga debido a que $K_U=1$, mientras que la corriente I_{zH_SAPC} es inyectada parcialmente a la carga debido a que $K_H=0.78$. La corriente que circula por el neutro se reduce, la componente de corriente fundamental que circula por el neutro se compensa totalmente, mientras que las componentes de corriente no fundamental son compensadas parcialmente. Tras la compensación la corriente efectiva $I_{e\#}$ de la red es reducida.

La potencia $S_{U1\#}$ es totalmente compensada, la potencia $S_{eN\#}$ es parcialmente eliminada, y la potencia Q_1^+ no es compensada, y $S_{e\#}$ es reducida. Gracias a que la red suministra menos corriente no fundamental, los THD_I 's se reducen considerablemente. Debido a que Q_1^+ no es compensada los factores de potencia $P_{F1\#}$ y P_{F1}^+ permanecen inalterados. El factor de potencia $P_{F\#}$ y el factor de potencia total $P_{FT\#}$ aumentan debido a la disminución de $S_{e\#}$.

6.2.2.4. Compensación de las potencias ineficientes de la carga usando la estrategia de compensación selectiva S4 (Q_1^+ , $S_{eN\#}$, $S_{U1\#}$).

En esta sección se muestran los resultados obtenidos cuando se decide compensar de forma selectiva las potencias ineficientes de la carga usando la secuencia de compensación S4 (Q_1^+ , $S_{eN\#}$, $S_{U1\#}$). De acuerdo a la secuencia de compensación elegida y siguiendo el método propuesto en el apartado 4.4.2 para el cálculo de los coeficientes, los coeficientes de escalado son $K_Q=1$, $K_H=0.72$, $K_U=0$. Las formas de onda de las corrientes de compensación que inyecta el SAPC se muestran en la figura 6-27. Las formas de onda de las corrientes que suministra la red eléctrica durante la conexión del SAPC se muestran en la figura 6-28.

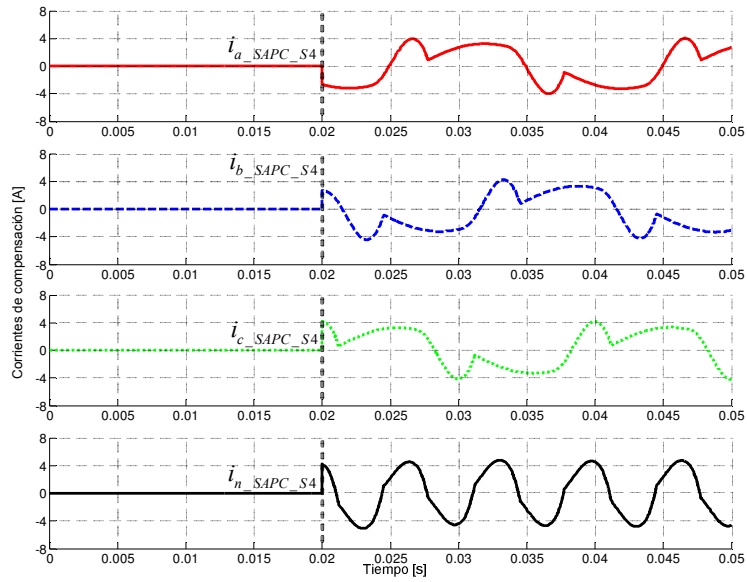


Figura 6-27. Corrientes de salida del SAPC y corriente del neutro usando la estrategia de compensación S4.

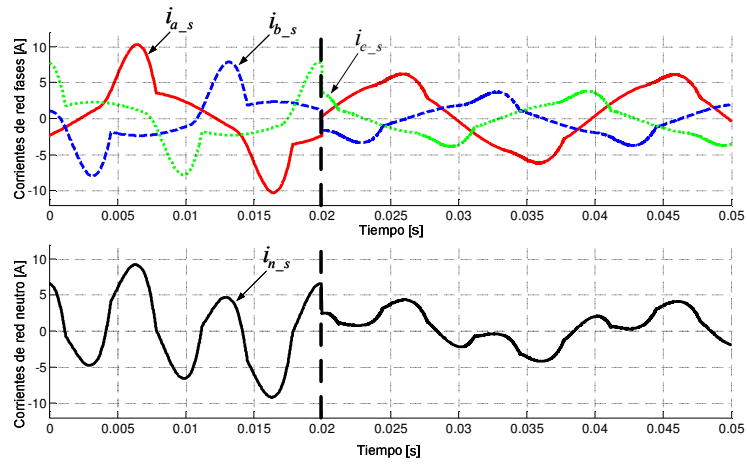


Figura 6-28. Corrientes en la red de suministro antes y durante la compensación con la estrategia S4.

Las corrientes que suministra la red eléctrica calculadas con las expresiones propuestas en la tesis se muestran en la tabla 6-27.

$I_a = 3.93 \text{ A}$		$I_b = 2.05 \text{ A}$		$I_c = 2.16 \text{ A}$		$I_n = 2.3 \text{ A}$	
$I_{a1} = 3.9 \text{ A}$	$\beta_{a1} = 0.87^\circ$	$I_{b1} = 1.99 \text{ A}$	$\beta_{b1} = 239.42^\circ$	$I_{c1} = 2.1 \text{ A}$	$\beta_{c1} = 118.36^\circ$	$I_{n1} = 1.9 \text{ A}$	$\beta_{n1} = 5.84^\circ$
$I_1^+ = 2.66 \text{ A}$	$\beta_1^+ = -0.15^\circ$	$I_1^- = 0.61 \text{ A}$	$\beta_1^- = 0.17^\circ$	$I_1^0 = 0.63 \text{ A}$	$\beta_1^0 = 5.84^\circ$		
$I_{aH} = 0.47 \text{ A}$		$I_{bH} = 0.5 \text{ A}$		$I_{cH} = 0.51 \text{ A}$		$I_{nH} = 1.31 \text{ A}$	
$I_{e\#} = 2.85 \text{ A}$			$I_{e1\#} = 2.80 \text{ A}$			$I_{eH\#} = 0.49 \text{ A}$	
$THD_{Ia^*} = 17.66 \%$		$THD_{Ib^*} = 18.79 \%$		$THD_{Ic^*} = 19.17 \%$		$THD_{In^*} = 18.42 \%$	

Tabla 6-27. Corrientes y THD_I 's de la red de suministro tras la compensación selectiva S4.

La tabla 6-28 presenta las magnitudes de potencia y los diferentes factores de análisis calculados a partir de los valores de las tensiones en el pcc y las corrientes suministradas por la red eléctrica durante la compensación.

$S_{e\#} = 1067.81 \text{ VA}$					
$S_{e1\#} = 1051.59 \text{ VA}$			$S_{eN\#} = 185.39 \text{ VA}$		
$S_1^+ = 997.74 \text{ VA}$		$S_{U1\#} = 332.21 \text{ VA}$	$D_{eH\#} = 185.39 \text{ VA}$	$S_{eH\#} = 0 \text{ VA}$	$D_{eV\#} = 0 \text{ VA}$
$P_1^+ = 997.74 \text{ W}$	$Q_1^+ = 0 \text{ var}$				
$S_{UV\#} = 0 \text{ VA}$	$S_{U1\#} = 332.21 \text{ VA}$	$S_{U1U\#} = 0 \text{ VA}$	$P_H = 0 \text{ W}$		$D_{eH\#} = 0 \text{ VA}$
$P = 998.81 \text{ W}$	$P_1 = 998.81 \text{ W}$		$P_H = 0 \text{ W}$		
$P_a = 487.52 \text{ W}$	$P_b = 248.81 \text{ W}$		$P_c = 262.47 \text{ W}$		
$P_{a1} = 487.52 \text{ W}$	$P_{b1} = 248.81 \text{ W}$		$P_{c1} = 262.47 \text{ W}$		
$P_1^+ = 998.5 \text{ W}$	$P_1^- = 0.03 \text{ W}$		$P_1^0 = 0 \text{ W}$		
$Q = 0 \text{ var}$	$Q_1 = 0 \text{ var}$		$Q_H = 0 \text{ var}$		
$P_{Fm} = 1$	$Q_1^- = 0 \text{ var}$		$Q_1^0 = 0 \text{ var}$		
$P_{F\#} = 0.94$	$P_{F1\#} = 0.95$		$P_{F1}^+ = 1$		
$P_{FT\#} = 0.93$	$UF = 0.92$		$I_e = 3.14 \text{ A}$		

Tabla 6-28. Potencias y factores de mérito en la red de suministro (compensación selectiva S4).

El SAPC genera las corrientes de compensación para reducir las corrientes de desfase, y de distorsión ($I_{z1_SAPC}^{+r}$, e I_{zH_SAPC}) demandadas por la carga. La corriente $I_{z1_SAPC}^{+r}$ es inyectada totalmente a la carga debido a que $K_Q=1$. y la corriente I_{zH_SAPC} es inyectada parcialmente a la carga debido a que $K_H=0.72$. Las componentes de corriente no fundamental que circulan por el neutro se compensan parcialmente, mientras que la componente de corriente fundamental que circula por el neutro no es compensada. Tras la compensación la corriente efectiva $I_{e\#}$ es reducida.

La potencia Q_1^+ es totalmente compensada, la potencia $S_{eN\#}$ es parcialmente eliminada, y la potencia $S_{U1\#}$ no es compensada, y $S_{e\#}$ es reducida. Gracias a que la red suministra menos corriente no fundamental, los THD_I 's se reducen considerablemente. Debido a que Q_1^+ es compensada totalmente el factor de potencia P_{F1}^+ es 1. El factor de potencia $P_{F1\#}$ aumenta pero

no llega a ser 1 debido a que $S_{e\#}$ todavía contiene a $S_{U1\#}$. El factor de potencia $P_{F\#}$ y el factor de potencia total $P_{FT\#}$ aumentan debido a la disminución de $S_{e\#}$.

6.2.2.5. Compensación de las potencias ineficientes de la carga usando las estrategias de compensación selectiva S5 ($S_{U1\#}, Q_1^+, S_{eN\#}$) y S6 ($Q_1^+, S_{U1\#}, S_{eN\#}$).

En esta sección se muestran los resultados obtenidos cuando se decide compensar de forma selectiva las potencias ineficientes de la carga. En este caso las secuencias de compensación S5 ($S_{U1\#}, Q_1^+, S_{eN\#}$) y S6 ($Q_1^+, S_{U1\#}, S_{eN\#}$) presentan los mismos resultados, ya que en ambos casos los coeficientes de escalado son $K_Q=1, K_U=1, K_H=0.26$. Las formas de onda de las corrientes de compensación que inyecta el SAPC se muestran en la figura 6-29. Las formas de onda de las corrientes que suministra la red eléctrica durante la conexión del SAPC se muestran en la figura 6-30.

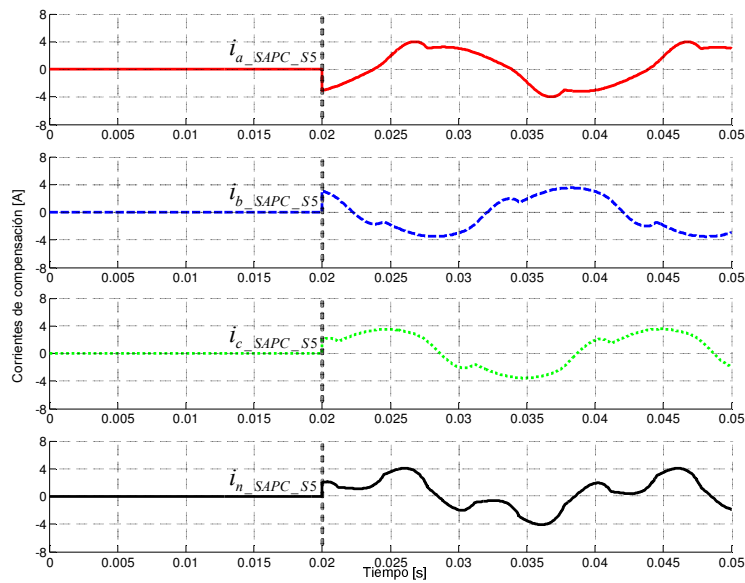


Figura 6-29. Corrientes de salida del SAPC y corriente del neutro usando la estrategia de compensación S5 y S6.

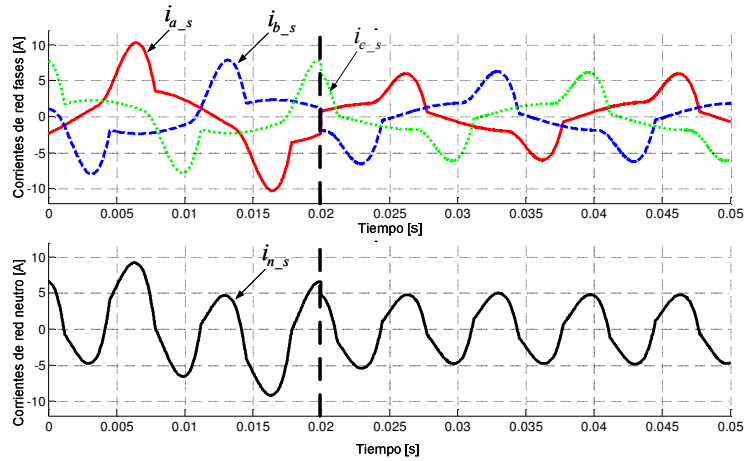


Figura 6-30. Corrientes en la red de suministro antes y durante la compensación con las estrategias S5 y S6.

La tabla 6-29 presenta las corrientes que suministra la red eléctrica tras la compensación.

$I_a = 2.95 \text{ A}$		$I_b = 3.07 \text{ A}$		$I_c = 3 \text{ A}$		$I_n = 3.53 \text{ A}$	
$I_{a1} = 2.67 \text{ A}$	$\beta_{a1} = -0.14^\circ$	$I_{b1} = 2.73 \text{ A}$	$\beta_{b1} = 239.61^\circ$	$I_{c1} = 2.66 \text{ A}$	$\beta_{c1} = 120.33^\circ$	$I_{n1} = 0.09 \text{ A}$	$\beta_{n1} = 229.08^\circ$
$I_1^+ = 2.69 \text{ A}$	$\beta_1^+ = -0.07^\circ$	$I_1^- = 0.02 \text{ A}$	$\beta_1^- = 89.41^\circ$	$I_1^0 = 0.03 \text{ A}$	$\beta_1^0 = -130.92^\circ$		
$I_{aH} = 1.27 \text{ A}$		$I_{bH} = 1.39 \text{ A}$		$I_{cH} = 1.39 \text{ A}$		$I_{nH} = 3.53 \text{ A}$	
$I_{e\#} = 3.01 \text{ A}$		$I_{e1\#} = 2.69 \text{ A}$		$I_{eH\#} = 1.35 \text{ A}$			
$THD_{Ia^*} = 47.57 \%$		$THD_{Ib^*} = 52.06 \%$		$THD_{Ic^*} = 52.06 \%$		$THD_{In^*} = 50.56 \%$	

Tabla 6-29. Corrientes y THD_I's de la red de suministro tras la compensación selectiva S5 y S6.

La tabla 6-30 presenta las magnitudes de potencia y los diferentes factores de análisis calculados a partir de las tensiones en el pcc y las corrientes de la red eléctrica.

$S_{e\#} = 1127.92 \text{ VA}$					
$S_{e1\#} = 1007.81 \text{ VA}$			$S_{eN\#} = 506.49 \text{ VA}$		
$S_1^+ = 1008.99 \text{ VA}$		$S_{U1\#} = 0 \text{ VA}$	$D_{e1\#} = 506.49 \text{ VA}$	$S_{eH\#} = 0 \text{ VA}$	$D_{eV\#} = 0 \text{ VA}$
$P_1^+ = 1008.99 \text{ W}$	$Q_1^+ = 0 \text{ var}$				
$S_{UV\#} = 0 \text{ VA}$	$S_{U1\#} = 0 \text{ VA}$	$S_{U1\#} = 0 \text{ VA}$	$P_H = 0 \text{ W}$		$D_{eH\#} = 0 \text{ VA}$
$P = 1007.75 \text{ W}$	$P_1 = 1007.75 \text{ W}$		$P_H = 0 \text{ W}$		
$P_a = 333.80 \text{ W}$	$P_b = 341.35 \text{ W}$		$P_c = 332.60 \text{ W}$		
$P_{a1} = 333.80 \text{ W}$	$P_{b1} = 341.35 \text{ W}$		$P_{c1} = 332.60 \text{ W}$		
$P_1^+ = 1008.99 \text{ W}$	$P_1^- = 0 \text{ W}$		$P_1^0 = 0 \text{ W}$		
$Q = 0 \text{ var}$	$Q_1 = 0 \text{ var}$		$Q_H = 0 \text{ var}$		
$P_{Fm} = 1$	$Q_1^- = 0 \text{ var}$		$Q_1^0 = 0 \text{ var}$		
$P_{F\#} = 0.89$	$P_{F1\#} = 1$		$P_{F1^+} = 1$		
$P_{FT\#} = 0.89$	$UF = 0.88$		$I_e = 3.63 \text{ A}$		

Tabla 6-30. Potencias y factores de mérito en la red de suministro (compensación selectiva S5 y S6).

El SAPC genera las corrientes de compensación para reducir las corrientes de desfase, de desequilibrio y de distorsión ($I_{z1_SAPC}^{+r}$, I_{zU1_SAPC} , y I_{zH_SAPC}) demandadas por la carga. Las corrientes $I_{z1_SAPC}^{+r}$, eI_{zU1_SAPC} son inyectadas totalmente a la carga debido a que $K_Q=1$ y $K_U=1$, y la corriente I_{zH_SAPC} es inyectada parcialmente a la carga debido a que $K_H=0.26$. La componente de corriente fundamental que circula por el neutro es compensada totalmente, mientras que las componentes de corriente no fundamental I_{nH} son compensadas parcialmente.

Las potencias Q_1^+ y $S_{U1\#}$ son totalmente compensadas, la potencia $S_{eN\#}$ es parcialmente eliminada, y $S_{e\#}$ es reducida. Gracias a que la red eléctrica suministra menos corriente no fundamental, los THD_I 's se reducen levemente. Debido a que Q_1^+ y $S_{U1\#}$ son compensadas totalmente los factores de potencia $P_{F1\#}$ y P_{F1}^+ son 1. El factor de potencia $P_{F\#}$ y el factor de potencia total $P_{FT\#}$ aumentan debido a la disminución de $S_{e\#}$.

6.2.2.6. Compensación de las potencias ineficientes de la carga usando la estrategia de compensación global modificada G_L .

En esta sección se muestran los resultados obtenidos cuando se realiza la compensación global con limitación de potencia o compensación global modificada "G_L". Aplicando el algoritmo propuesto en sección 4.4.1.3, ecuación (4.41), el coeficiente de escalado es $K_G=0.66$. Las formas de onda de las corrientes de compensación que inyecta el SAPC se muestran en la figura 6-31. Las formas de onda de las corrientes que suministra la red eléctrica durante la conexión del SAPC se muestran en la figura 6-32.

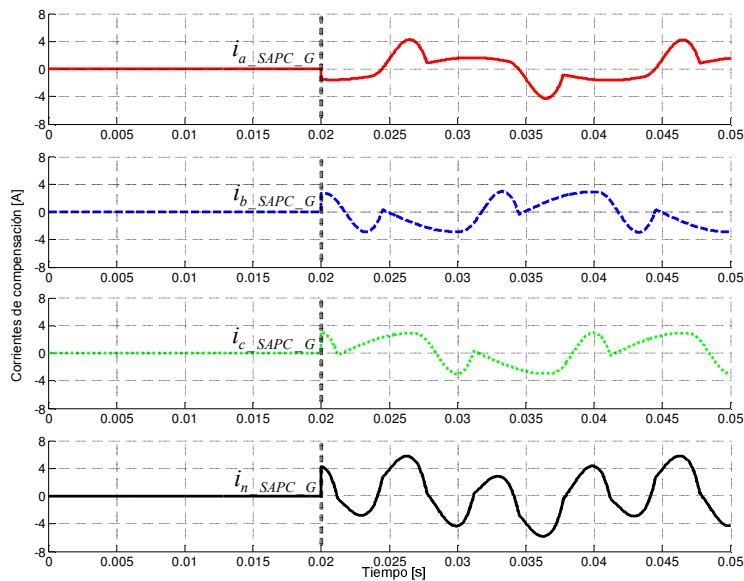


Figura 6-31. Corrientes de salida del SAPC y corriente del neutro usando la estrategia de compensación G_L .

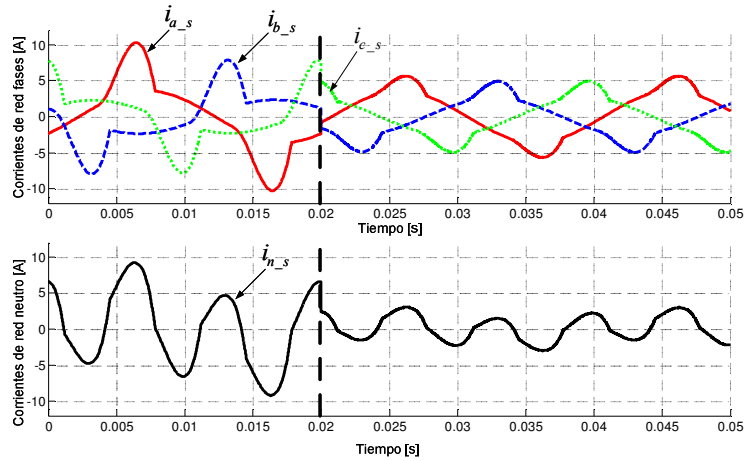


Figura 6-32. Corrientes en la red de suministro antes y durante la compensación con la estrategia G_L .

La tabla 6-31 presenta las corrientes que suministra la red eléctrica tras la compensación.

$I_a = 3.24 \text{ A}$		$I_b = 2.66 \text{ A}$		$I_c = 2.68 \text{ A}$		$I_n = 1.74 \text{ A}$	
$I_{a1} = 3.19 \text{ A}$	$\beta_{a1} = -14.49^\circ$	$I_{b1} = 2.58 \text{ A}$	$\beta_{b1} = 221.31^\circ$	$I_{c1} = 2.6 \text{ A}$	$\beta_{c1} = 101.47^\circ$	$I_{n1} = 0.63 \text{ A}$	$\beta_{n1} = 4.43^\circ$
$I_1^+ = 2.79 \text{ A}$	$\beta_1^+ = -17.05^\circ$	$I_1^- = 0.21 \text{ A}$	$\beta_1^- = 1.13^\circ$	$I_1^0 = 0.21 \text{ A}$	$\beta_1^0 = 4.43^\circ$		
$I_{aH} = 0.58 \text{ A}$		$I_{bH} = 0.63 \text{ A}$		$I_{cH} = 0.63 \text{ A}$		$I_{nH} = 1.62 \text{ A}$	
$I_{e\#} = 2.87 \text{ A}$		$I_{e1\#} = 2.80 \text{ A}$		$I_{eH\#} = 0.61 \text{ A}$			
$THD_{Ia^*} = 21.74 \%$		$THD_{Ib^*} = 23.62 \%$		$THD_{Ic^*} = 23.62 \%$		$THD_{In^*} = 22.87 \%$	

Tabla 6-31. Corrientes y THD_I 's de la red de suministro tras la compensación G_L .

La tabla 6-32 presenta las magnitudes de potencia y los diferentes factores de análisis calculados a partir de las tensiones en el pcc y las corrientes de la red eléctrica.

$S_{e\#} = 1077.49 \text{ VA}$					
$S_{e1\#} = 1051.87 \text{ VA}$			$S_{eN\#} = 233.55 \text{ VA}$		
$S_1^+ = 1046.50 \text{ VA}$		$S_{U1\#} = 106.14 \text{ VA}$	$D_{e1\#} = 233.55 \text{ VA}$	$S_{eH\#} = 0 \text{ VA}$	$D_{eV\#} = 0 \text{ VA}$
$P_1^+ = 1000.5 \text{ W}$	$Q_1^+ = 306.84 \text{ var}$				
$S_{UV\#} = 0 \text{ VA}$	$S_{U1\#} = 106.14 \text{ VA}$	$S_{U1\#} = 0 \text{ VA}$	$P_H = 0 \text{ W}$	$D_{eH\#} = 0 \text{ VA}$	
$P = 999.97 \text{ W}$	$P_1 = 999.97 \text{ W}$		$P_H = 0 \text{ W}$		
$P_a = 386.12 \text{ W}$	$P_b = 305.59 \text{ W}$		$P_c = 308.24 \text{ W}$		
$P_{a1} = 386.12 \text{ W}$	$P_{b1} = 305.59 \text{ W}$		$P_{c1} = 308.24 \text{ W}$		
$P_1^+ = 1000.5 \text{ W}$	$P_1^- = 0 \text{ W}$		$P_1^0 = 0 \text{ W}$		
$Q = 306.84 \text{ var}$	$Q_1 = 306.84 \text{ var}$		$Q_H = 0 \text{ var}$		
$P_{Fm} = 0.95$	$Q_1^- = 0 \text{ var}$		$Q_1^0 = 0 \text{ var}$		
$P_{F\#} = 0.93$	$P_{F1\#} = 0.95$		$P_{F1^+} = 0.95$		
$P_{FT\#} = 0.93$	$UF = 0.58$		$I_e = 3.04 \text{ A}$		

Tabla 6-32. Potencias y factores de mérito en la red de suministro (compensación G_L).

El SAPC genera las corrientes de compensación para reducir las corrientes de desfase, de desequilibrio y de distorsión ($I_{z1_SAPC}^{+r}$, I_{zU1_SAPC} , y I_{zH_SAPC}) demandadas por la carga. Las corrientes $I_{z1_SAPC}^{+r}$, I_{zU1_SAPC} , y I_{zH_SAPC} son inyectadas parcialmente a la carga debido a que K_G es 0.66, y las corrientes fundamentales y no fundamentales que circulan por el neutro son compensadas parcialmente. Las potencias Q_1^+ , $S_{U1\#}$, y $S_{eN\#}$ son parcialmente compensadas, y $S_{e\#}$ es reducida. Gracias a que la red suministra menos corriente no fundamental, los THD_I 's se reducen. Debido a que Q_1^+ es compensada parcialmente los factores de potencia $P_{F1\#}$ y P_{F1}^+ aumentan pero no llegan a 1. El factor de potencia $P_{F\#}$ y el factor de potencia total $P_{FT\#}$ aumentan debido a la disminución de $S_{e\#}$.

6.2.2.7. Compensación de las corrientes del neutro. Estrategia de compensación N.

En esta sección se muestran los resultados obtenidos cuando se realiza la compensación de la corriente del neutro "N", descrita en la sección 4.3.3. Los coeficientes de escalado a utilizar en la ecuación (4.33) para este caso son $K_{I\phi} = 1$ y $K_{I_{nH}} = 1$. En este caso se compensan las corrientes I_1^0 e I_H^0 siendo totalmente eliminadas de las fases a , b , y c y del neutro. Las formas de onda de las corrientes de compensación que inyecta el SAPC se muestran en la figura 6-33. Las formas de onda de las corrientes que suministra la red eléctrica durante la conexión del SAPC se muestran en la figura 6-34.

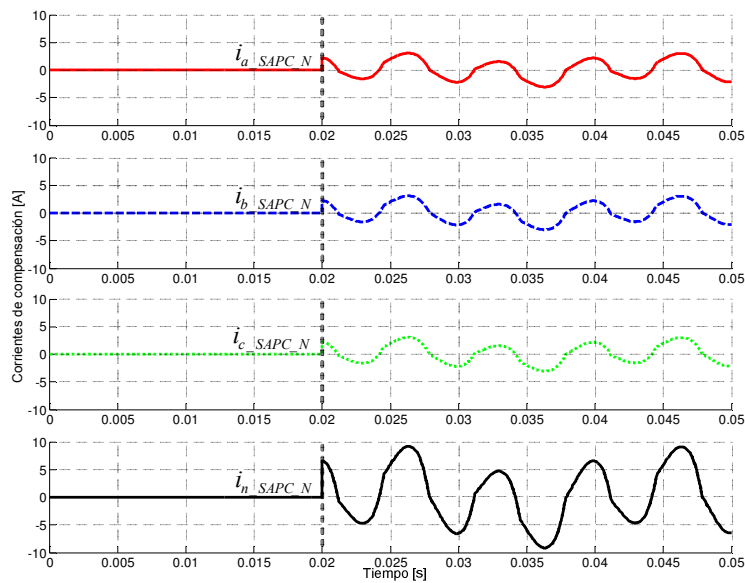


Figura 6-33. Corrientes de salida del SAPC y corriente del neutro usando la estrategia de compensación N.

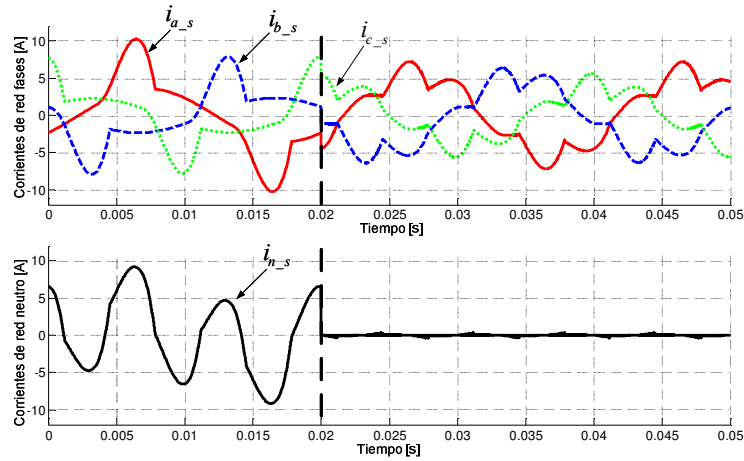


Figura 6-34. Corrientes en la red de suministro antes y durante la compensación con la estrategia de compensación N.

La tabla 6-33 presenta las corrientes que suministra la red eléctrica tras la compensación.

$I_a = 4.23 \text{ A}$		$I_b = 3.91 \text{ A}$		$I_c = 3.15 \text{ A}$		$I_n = 0.01 \text{ A}$	
$I_{a1} = 4.13 \text{ A}$	$\beta_{a1} = -35.73^\circ$	$I_{b1} = 3.8 \text{ A}$	$\beta_{b1} = 188.71^\circ$	$I_{c1} = 3.02 \text{ A}$	$\beta_{c1} = 82.28^\circ$	$I_{n1} = 0.01 \text{ A}$	$\beta_{n1} = 90.85^\circ$
$I_1^+ = 3.62 \text{ A}$	$\beta_1^+ = -41.67^\circ$	$I_1^- = 0.65 \text{ A}$	$\beta_1^- = -0.43^\circ$	$I_1^0 = 0 \text{ A}$	$\beta_1^0 = 90.85^\circ$		
$I_{aH} = 0.91 \text{ A}$		$I_{bH} = 0.91 \text{ A}$		$I_{cH} = 0.91 \text{ A}$		$I_{nH} = 0 \text{ A}$	
$I_{e\#} = 3.79 \text{ A}$		$I_{e1\#} = 3.68 \text{ A}$		$I_{eH\#} = 0.91 \text{ A}$			
$THD_{Ia^*} = 33.65 \%$		$THD_{Ib^*} = 33.65 \%$		$THD_{Ic^*} = 33.65 \%$		$THD_{In^*} = 33.65 \%$	

Tabla 6-33. Corrientes y THD_i 's de la red de suministro tras la compensación selectiva de las corrientes del neutro.

La tabla 6-34 presenta las magnitudes de potencia y los diferentes factores de análisis calculados a partir de las tensiones en el pcc y las corrientes de la red eléctrica.

$S_{e\#} = 1421.43 \text{ VA}$					
$S_{e1\#} = 1379.83 \text{ VA}$			$S_{eN\#} = 341.38 \text{ VA}$		
$S_1^+ = 1357.5 \text{ VA}$		$S_{L1\#} = 247.24 \text{ VA}$	$D_{e1\#} = 341.38 \text{ VA}$	$S_{eH\#} = 0 \text{ VA}$	$D_{eV\#} = 02 \text{ VA}$
$P_1^+ = 1014.03 \text{ W}$	$Q_1^+ = 902.52 \text{ var}$				
$S_{LV\#} = 0 \text{ VA}$	$S_{LV1\#} = 247.24 \text{ VA}$	$S_{LVH\#} = 0 \text{ VA}$	$P_H = 0 \text{ W}$		$D_{eH\#} = 0 \text{ VA}$
$P = 1014.83 \text{ W}$	$P_1 = 1014.83 \text{ W}$		$P_H = 0 \text{ W}$		
$P_a = 418.93 \text{ W}$	$P_b = 297.16 \text{ W}$		$P_c = 298.74 \text{ W}$		
$P_{a1} = 418.93 \text{ W}$	$P_{b1} = 297.16 \text{ W}$		$P_{c1} = 298.74 \text{ W}$		
$P_1^+ = 1015.09 \text{ W}$	$P_1^- = 0.03 \text{ W}$		$P_1^0 = 0 \text{ W}$		
$Q = 902.52 \text{ var}$	$Q_1 = 902.52 \text{ var}$		$Q_H = 0 \text{ var}$		
$P_{Fm} = 0.74$	$Q_1^- = 0 \text{ var}$		$Q_1^0 = 0 \text{ var}$		
$P_{F\#} = 0.71$	$P_{F1\#} = 0.73$		$P_{F1^+} = 0.74$		
$P_{FT\#} = 0.71$	$UF = 0.69$		$I_e = 3.8 \text{ A}$		

Tabla 6-34. Potencias y factores de mérito en la red de suministro (compensación N).

El SAPC genera las corrientes de compensación para reducir las corrientes que circulan por el neutro y que son demandadas por la carga. La potencia Q_1^+ no es compensada permaneciendo prácticamente inalterada, mientras que $S_{U1\#}$, y $S_{eN\#}$ son parcialmente compensadas, y $S_{e\#}$ es reducida. Gracias a que la red suministra menos corriente no fundamental, los THD_I 's se reducen. El factor de potencia $P_{F1\#}$ aumenta ligeramente debido a la disminución $S_{e1\#}$. El factor de potencia $P_{F\#}$ y el factor de potencia total $P_{FT\#}$ aumentan debido a la disminución de $S_{e\#}$. Debido a que Q_1^+ no es compensada P_{F1^+} permanece prácticamente igual.

6.2.2.8. Análisis de los criterios para la compensación con limitación de potencia.

A continuación se agruparán los resultados de simulación obtenidos tras realizar la compensación con las estrategias de compensación planteadas en la tesis para la carga estudiada en esta sección. Se compararan los indicadores de los diferentes criterios de compensación para las siguientes estrategias planteadas en la tesis:

- Estrategia de compensación global sin limitación de potencia o estrategia de compensación G_T . Esta estrategia se incluye para comparar los casos en el que el SAPC tiene limitación de potencia con el caso ideal sin limitación de potencia.
- Estrategias de compensación selectiva con limitación de potencia (S1, S2, S3, S4, S5, y S6).
- Estrategia de compensación global modificada con limitación de potencia G_L .
- Estrategia de compensación para eliminar las corrientes de neutro o estrategia de compensación N.

En la tabla 6-35 se resumen las potencias que suministra la red antes y durante la compensación usando las diferentes estrategias de compensación. En las columnas sombreadas de la izquierda, se muestran en la primera columna las potencias P_1^+ , Q_1^+ , $S_{U1\#}$, $S_{eN\#}$, y $S_{e\#}$. En la segunda columna se muestran los valores de estas potencias en la carga o en la red antes de la compensación. En las columnas de la derecha, se muestran los valores en la red de cada una de estas potencias para cada estrategia de compensación.

		ESTRATEGIAS DE COMPENSACIÓN								
Potencia	CARGA	G_T	S1	S2	S3	S4	S5	S6	G_L	N
P_1^+ (W)	1001.51	997.86	993.89	994.72	998.71	997.74	1008.99	1008.99	1000.5	1014.03
Q_1^+ (var)	894.51	0	891.77	565.08	892.01	0	0	0	306.84	902.52
$S_{U1\#}$ (VA)	332.73	15.91	165.83	326.82	6.13	332.21	0	0	106.14	247.24
$S_{eN\#}$ (VA)	680.41	0	0	0	141.94	185.39	506.49	506.49	233.55	341.38
$S_{e\#}$ (VA)	1541.70	997.86	1345.58	1189.79	1346.59	1067.81	1127.92	1127.92	1077.49	1421.43

Tabla 6-35. Potencias de la red antes y durante la compensación usando las diferentes estrategias de compensación.

Antes de la compensación, la carga demanda de la red eléctrica las potencias P_1^+ , Q_1^+ , $S_{U1\#}$, y $S_{eN\#}$. La potencia P_1^+ permanece prácticamente igual antes y durante el funcionamiento del SAPC para todas las estrategias de compensación, mientras que las potencias Q_1^+ , $S_{U1\#}$, y $S_{eN\#}$ se reducen en diferentes proporciones de acuerdo a la estrategia de compensación utilizada. La estrategia de compensación G_T reduce considerablemente todas las potencias ineficientes de la carga. Las estrategias de compensación selectiva reducen las potencias ineficientes de acuerdo a la secuencia de compensación elegida haciendo que algunas potencias ineficientes sean reducidas a cero. La estrategia de compensación G_L reduce parcialmente todas las potencias ineficientes. La estrategia de compensación N reduce las potencias ineficientes asociadas con las corrientes de secuencia cero ($S_{U1\#}$, y $S_{eN\#}$) pero con esta estrategia Q_1^+ no es compensada.

Si no se supera el límite de potencia en el SAPC, con la estrategia de compensación G_T la red sólo suministra a la carga P_1^+ . Cuando se supera el límite de potencia del SAPC, la estrategia de compensación que provoca mayor disminución de la potencia aparente efectiva suministrada por la red es la estrategia de compensación G_L , mientras que la estrategia que provoca menor disminución de la potencia aparente efectiva suministrada por la red es la estrategia de compensación N.

En la tabla 6-36 se resumen los factores de mérito en la red de suministro para evaluar los criterios para el caso estudiado en esta sección. En las columnas de la izquierda sombreadas, se muestran en la primera columna los indicadores que sirven para evaluar cada criterio de selectividad, y en la segunda columna se resumen los valores que toman cada uno de estos indicadores en la carga o en la red antes de realizar la compensación. En las columnas de la derecha, se resumen los factores de mérito en la red eléctrica para evaluar los criterios de compensación.

		ESTRATEGIAS DE COMPENSACIÓN								
Indicador	CARGA	G_T	S1	S2	S3	S4	S5	S6	G_L	N
P_{Fm}	0.75	1	0.74	0.87	0.75	1	1	1	0.95	0.74
$P_{FT\#}$	0.65	1	0.74	0.84	0.74	0.93	0.89	0.89	0.93	0.71
UF	----	-----	0.63	0.69	0.56	0.92	0.88	0.88	0.58	0.69
I_e (A)	5.05	2.67	3.63	3.36	3.64	3.14	3.63	3.63	3.04	3.8
I_a (A)	5.02	2.67	4.02	4.15	3.59	3.93	2.95	2.95	3.24	4.23
I_b (A)	3.72	2.66	3.32	2.48	3.61	2.05	3.07	3.07	2.66	3.91
I_c (A)	3.67	2.67	3.38	2.61	3.57	2.16	3	3	2.68	3.15
I_n (A)	5.28	0.01	0.94	1.91	1.07	2.3	3.53	3.53	1.74	0.01

Tabla 6-36. Factores de mérito en la red de suministro para evaluar criterios de compensación.

La red, antes de la compensación, tiene un factor $P_{FT\#}$ de la carga es 0.65 lo que es considerado bastante malo por la cantidad de potencia ineficiente que suministra la red a la carga. También, antes de la compensación, la red suministra a la carga potencia reactiva Q_1^+ de 894.51 var con

un P_{Fm} de 0.75. En este caso, la empresa distribuidora de energía penaliza al usuario cobrándole la energía reactiva que demanda.

Con la estrategia de compensación G_T que representa el caso ideal cuando no existe limitación de potencia se compensan todas las potencias ineficientes de la carga mejorando al máximo la calidad de la potencia ($P_{FT\#}=1$), reduciendo al máximo el costo de la factura de energía ($P_{Fm}=1$), reduciendo al máximo las pérdidas de potencia en el sistema eléctrico de distribución, eliminando completamente la corriente del neutro, y evitando superar los límites térmicos para los conductores.

Los indicadores que valoran los criterios de compensación para la carga de la simulación cuando existe limitación de potencia son analizados a continuación:

- La potencia reactiva Q es el indicador que sirve para evaluar el valor de la factura de energía, mientras que el factor P_{Fm} es el indicador que sirve para determinar si la potencia reactiva se cobra o no. La potencia Q coincide con Q_1^+ debido a que Q_1^- , Q_1^0 , y Q_H son nulas. Con la estrategia de compensación G_L , la red suministra a la carga Q_1^+ con un valor de 306.84 var y un P_{Fm} de 0.95. Con este valor de P_{Fm} , que se encuentra justo en el límite, la potencia reactiva es facturada y el usuario final es sancionado. Las estrategias que más disminuyen el valor de la factura de energía son las estrategias S4, S5, y S6, ya que la red suministra un valor de Q nulo con un factor P_{Fm} igual a 1. Esto se debe que las estrategias S4 y S6 tienen como prioridad compensar Q_1^+ , mientras que la estrategia S5 aunque tiene como prioridad compensar a $S_{U1\#}$ compensa completamente a Q_1^+ .
- El factor de potencia total $P_{FT\#}$ es un indicador de la calidad de la potencia que compara la potencia eficiente aprovechada por la carga (P_1^+) y el conjunto total de potencia demandada por la carga ($S_{e\#}$). La carga demanda potencia aparente con un factor $P_{FT\#}$ igual a 0.65. Cuando se supera el límite de potencia en el SAPC, las estrategias que más contribuyen a la mejora de $P_{FT\#}$ son las estrategias S4 y G con un $P_{FT\#}$ de 0.93. Para la carga analizada en esta sección, cualquiera de estas dos estrategias de compensación puede ser usada indiferentemente si se desea mejorar al máximo la calidad de la potencia suministrada por la red eléctrica.
- El factor de uso UF es un indicador del aprovechamiento de la potencia disponible en el SAPC. En el modo limitación de potencia con ninguna estrategia de compensación se alcanza el valor máximo de UF ($UF=1$). La estrategia que más aprovecha la potencia del SAPC es la estrategia de compensación S4 con un UF de 0.92, mientras que la estrategia que menos aprovecha la potencia del SAPC es la estrategia de compensación S3 con un UF de 0.56.

- La corriente efectiva de la IEEE Std. 1459-2010 (I_e) es utilizada en esta tesis para valorar las pérdidas de potencia de los sistemas eléctricos. Antes de la compensación la corriente efectiva era de 5.05 A. Con todas las estrategias de compensación I_e disminuye indicando una reducción de las pérdidas de potencia en el sistema eléctrico de distribución. Idealmente, sin limitación de potencia, el SAPC con la estrategia de compensación G_T reduce las pérdidas de potencia en el sistema eléctrico al mínimo, ya que la red sólo suministra a la carga $I_e = I_1^{+a} = 2.67$ A. Cuando se supera el límite de potencia en el SAPC, las estrategias que más reducen las pérdidas de potencia en el sistema de distribución son las estrategias de compensación S4 y G_L con corrientes efectivas de 3.14 A y 3.04 A respectivamente, mientras que la estrategia que menos reduce las pérdidas de potencia en el sistema de distribución es la estrategia de compensación N con una I_e de 3.8 A. Con la estrategia de compensación N a pesar de que se compensa totalmente la corriente del neutro no se minimiza al máximo las pérdidas de potencia en el sistema de distribución.
- Las corrientes I_a , I_b , I_c , e I_n se pueden utilizar para verificar que en los conductores de alimentación no se supere el límite térmico de corriente, para verificar si las corrientes están equilibradas, y si existe corriente por el neutro.

En la sección 5.8 del capítulo 5, se ordenaron los criterios de compensación teniendo en cuenta dos puntos de vista, de acuerdo a las necesidades que tienen las empresas distribuidoras de energía y de acuerdo a las necesidades de los usuarios finales. A continuación se realizará un análisis con los resultados obtenidos, para la carga de la simulación se seleccionará la estrategia de compensación que más convenga a los usuarios finales y a las empresas distribuidoras de energía.

Usuarios finales: el primer criterio de compensación es minimizar el costo de la factura eléctrica, por lo que se debe utilizar el compensador para aumentar el P_{Fm} a un valor mayor o igual a 0.96. Para la carga de la simulación, las estrategias que pueden ser utilizadas indiferentemente son las estrategias S4, S5, S6 ya que tienen un P_{Fm} igual a 1 reduciendo Q_1^+ a cero. Para decidir cual de estas tres estrategias usar, se evaluará el segundo criterio de compensación.

El segundo criterio de compensación es mejorar la calidad de la potencia en los sistemas eléctricos. El factor de potencia $P_{FT\#}$ es 0.93 para la estrategia S4 y 0.89 para las estrategias S5 y S6, por lo que se elige a la estrategia S4 debido a que disminuye al máximo las potencias ineficientes en la red eléctrica. Debido a que ya se seleccionó la estrategia de compensación a utilizar no es necesario evaluar el resto de los criterios de compensación.

Empresas distribuidoras de energía: el primer criterio de compensación es contribuir con la estabilidad de los sistemas eléctricos. En este caso el SAPC selectivo debe emplearse para suministrar Q_1^+ a las redes eléctricas, de tal modo que los generadores eléctricos puedan

trabajar en una zona segura de operación garantizando su estabilidad. Si los SAPC selectivos suministran potencia reactiva, los generadores conectados a la red eléctrica pueden emplearse para generar potencia activa que es vendida y facturada al usuario final. En el caso de ocurrencia de un hueco de tensión o alta demanda de potencia reactiva, toda la potencia del SAPC debe ser empleada para suministrar Q_1^+ . Cuando el sistema está trabajando de forma estable y no existe alta demanda de potencia reactiva, pueden usarse las estrategias de compensación S4 y S6 que tienen como prioridad suministrar Q_1^+ , para decidir cual de estas dos estrategias usar, se evaluará el segundo criterio de compensación.

El segundo criterio de compensación es mejorar la calidad de la potencia en los sistemas eléctricos. El factor de potencia $P_{FT\#}$ es 0.93 para la estrategia S4 y 0.89 para la estrategia S6, por lo que se elige a la estrategia S4 debido a que disminuye al máximo las potencias ineficientes en la red eléctrica. En este caso concreto, debido a que ya se seleccionó la estrategia de compensación a utilizar no es necesario evaluar el resto de los criterios de compensación.

6.3. Conclusiones.

En este capítulo se validaron mediante simulación las corrientes de compensación utilizadas para la reducción de las potencias ineficientes en la red eléctrica, mediante simulación se obtuvieron las corrientes de la carga, de la red, y del SAPC. Se validaron las corrientes de compensación para la reducción individual de cada potencia ineficiente (Q_1^+ , $S_{U1\#}$, y $S_{eN\#}$), para cualquier combinación de ellas, y para las estrategias de compensación propuestas en la tesis (estrategias G_T , S1, S2, S3, S4, S5, S6, G_L , y N)

Se analizaron los criterios de compensación para las diferentes estrategias de compensación planteadas. Para la carga utilizada en la simulación, se determinó la estrategia de compensación que más le conviene al usuario final y a las empresas distribuidoras de energía. En otros casos puede ser necesario evaluar el resto de los criterios de compensación para intentar determinar la estrategia de compensación más adecuada. También es posible dar una ponderación a cada criterio de compensación para obtener una valoración global de cada estrategia de compensación y realizar la elección teniendo una visión de conjunto en lugar de analizar de forma individualizada cada criterio. La elección de los factores de ponderación es una tarea compleja y que se abordará en estudios posteriores.

7. Ensayos y resultados experimentales.

En este capítulo se muestran los resultados experimentales obtenidos mediante la implementación física en el laboratorio de un prototipo experimental del SAPC propuesto. Esta plataforma fue originalmente diseñada por el grupo de electrónica de potencia de la Universitat Politècnica de València, habiéndose actualizado y mejorado algunos aspectos del diseño para el desarrollo de la presente tesis. La placa de adaptación de los sensores del inversor VSI, la placa de acondicionamiento de las señales correspondiente al sensado de voltajes y corrientes, y la placa de adaptación de las señales de los PWM's fueron modernizadas e integradas en una nueva placa. El DSP utilizado es el DSP (TMS320F2812), sin embargo, la nueva placa contiene un sistema de conectores que permite intercambiar los pines de entrada y salida de la DSP, por lo que es posible usar cualquier DSP de la familia TMS320F. La implementación del SAPC junto con la carga utilizada para hacer las pruebas puede verse en la figura 7-1.

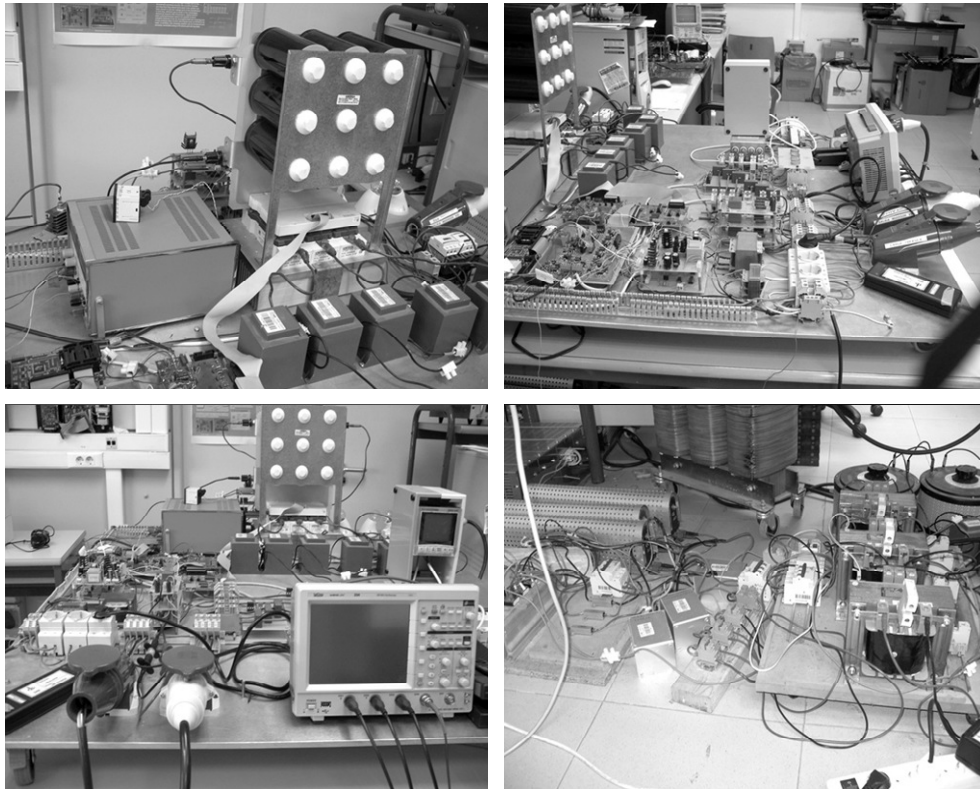


Figura 7-1. Implementación del SAPC y cargas usadas en la parte experimental.

En la figura 7-2 se presenta el diagrama de bloques del sistema completo incluyendo todos los sistemas involucrados en el prototipo.

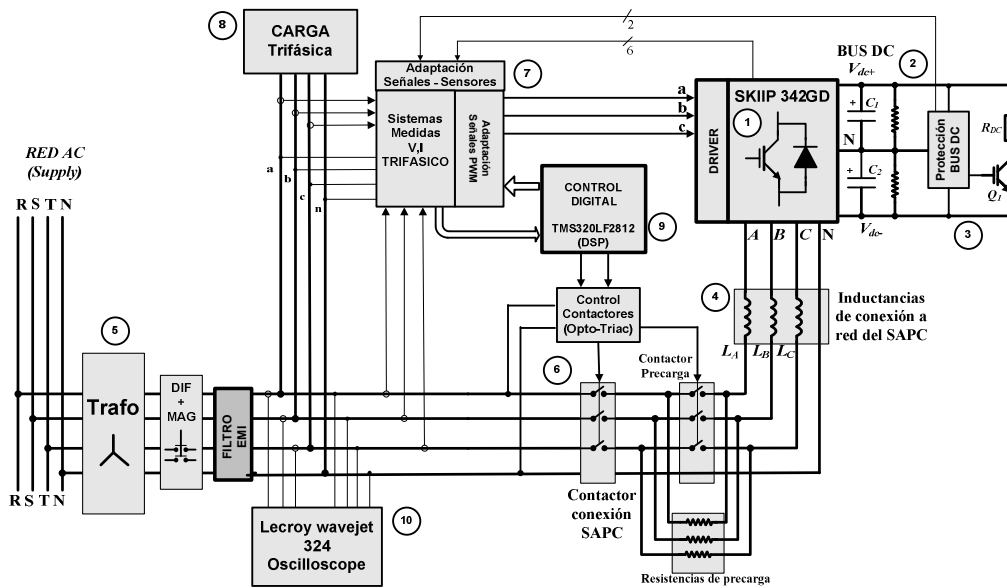


Figura 7-2. Diagrama de bloques del prototipo experimental implementado en el laboratorio.

Las características de los principales componentes utilizados para la implementación de la plataforma hardware del prototipo de compensador activo se detallan a continuación. La sección de potencia está constituida por los siguientes componentes identificados por los números en la figura 7-2:

1. Módulo de potencia inteligente (IPM), SKiIP 342GD120-314CTV, que incluye seis transistores IGBT de potencia y los circuitos de excitación aislados correspondientes, incorporando además las siguientes características:

- Sistema de medida aislado de las corrientes de salida en la parte de alterna.
- Protecciones incorporadas frente a fallos en la alimentación del módulo, sobretensión y sobrecorrientes.
- Entradas de disparo compatibles con lógica CMOS con supresión de solapes en la conducción simultánea de los transistores de una misma rama (dead-time típico de $3\mu\text{s}$) y eliminación de pulsos de disparo muy cortos ($t_{\text{pulso}} < 750\text{ns}$).
- Aislamiento entre el circuito de control y el driver de la etapa de potencia mediante DC/DC aislado.

La figura 7-3 presenta el esquema eléctrico del inversor y las señales de entrada y salida del driver.

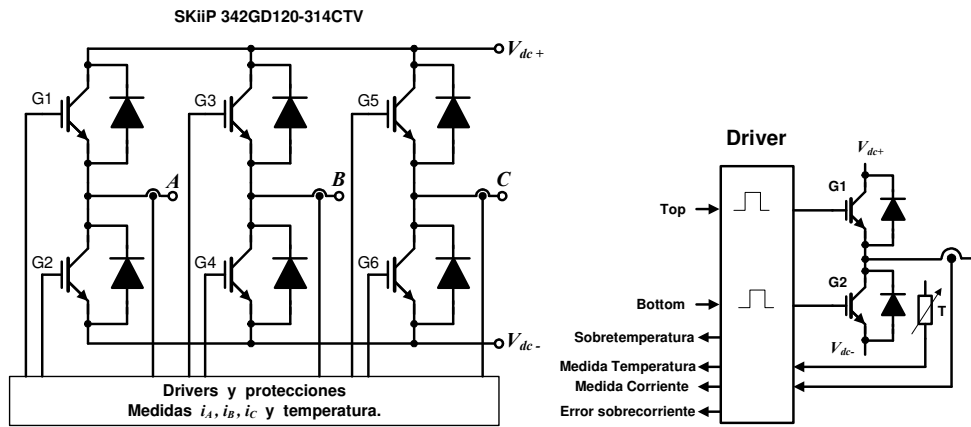


Figura 7-3. SKiiP 342GD y, entradas y salidas de cada semipuente.

2. Bus de continua formado por la asociación serie / paralelo de condensadores electrolíticos de alta capacidad y alta tensión. La capacidad total del bus de continua es de 7 mF. La máxima tensión es de 800V. El bus dc dispone de resistencias para la equalización pasiva de los desequilibrios entre las tensiones de los condensadores de la parte alta y de la parte baja. En la figura 7-4 se presenta el esquema eléctrico del bus dc.

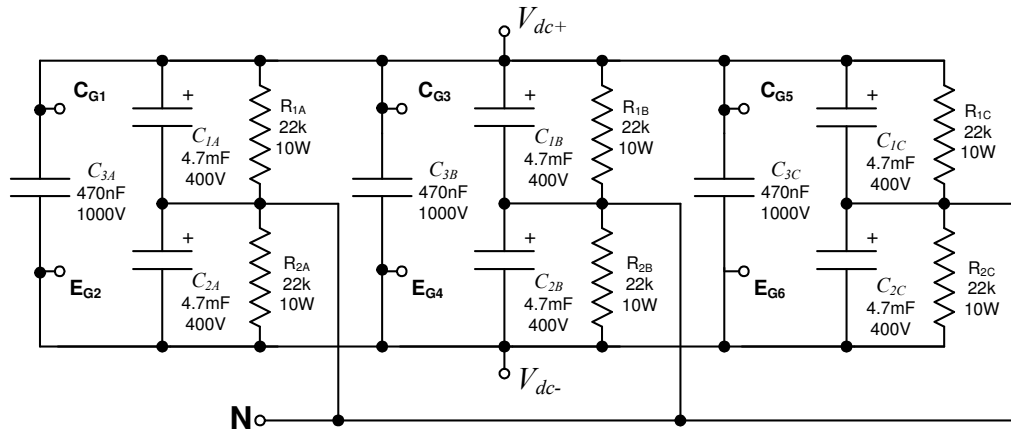


Figura 7-4. Bus de continua de la etapa de potencia.

Las características de los condensadores electrolíticos utilizados son las siguientes:

- Capacidad nominal: 4700 μ F (\pm 20%).
- Tensión nominal: 400V.
- Tensión máxima: 440V (durante 30s).

- Resistencia Serie Equivalente (ESR): $33\text{m}\Omega$ (max, 100Hz).
- Rizado de corriente – valor eficaz ($I_{r\text{ rms}}$): 13.4 A (max, 100Hz, 85°C).

El condensador MKP (condensador de plástico metalizado a base de polipropileno) de alta frecuencia ($C_{3A,B,C}$) utilizado es de 470nF, 1000V y se encuentra conectado en bornes de los contactos de potencia de cada uno de los semipuentes del inversor.

3. Circuito de protección frente a sobretensiones excesivas en el bus DC. El circuito de protección compara continuamente la medida de tensión del bus DC con su valor de referencia, establecido como tensión máxima. Cuando la tensión del bus dc supera el valor de referencia se dispara un transistor IGBT que conecta el bus dc sobre una resistencia de descarga. A la vez, se activa una de las entradas de interrupción externa del DSP, dispuesta para la protección de la etapa de potencia del sistema de control que se encarga de detener el sistema.

4. Bobinas de conexión a red. Las bobinas de conexión a red cumplen la misión de interconectar las dos fuentes de tensión, el bus DC del inversor VSI y la red eléctrica, actuando además como filtro de la corriente de salida generada por el SAPC. Las bobinas utilizadas en el prototipo tienen las siguientes características:

- Valor de la inductancia de cada bobina $L=3\text{ mH}$.
- Corriente eficaz $I_{L\text{ RMS}}=10\text{ A}$.

Se han utilizado dos bobinas en serie por cada rama, por lo que la inductancia total es de 6 mH por rama.

5. Transformador de aislamiento entre el compensador y la red de suministro. Se trata de un transformador de 20 kVA configurable. El transformador dispone de varios secundarios (220 V – 125 V – 80 V) que permiten obtener diferentes configuraciones. Primario y secundario se conectan en estrella. Para las diferentes pruebas que se presentan en el capítulo de resultados experimentales, se ha empleado el secundario de 125 V para obtener un sistema de tensiones equilibrado $V_{As}=V_{Bs}=V_{Cs}=125\text{ V}$. El primario se conecta a la red eléctrica trifásica de 220 V.

6. Para el arranque del equipo se ha provisto de un sistema de conexión mediante contactores. Un contactor se encarga de la conexión general del SAPC a la red eléctrica. Cuando se produce la conexión del contactor general, se realiza una precarga inicial del bus dc a través de resistencias las cuales son cortocircuitadas mediante un segundo contactor cuando la tensión del bus dc alcanza un valor adecuado.

7. La nueva placa diseñada para modernizar el prototipo de SAPC del laboratorio incluye:

- Los circuitos de adaptación de señales: señales de error del IPM y señales de disparo PWM.

- Un sistema de medidas trifásico encargado de obtener los valores de las corrientes de carga, las corrientes de salida del SAPC y, de las tensiones en el pcc.
- Un sistema de drivers utilizado para acondicionar las señales de control (PWM's) generados por el DSP.

8. Carga trifásica. La carga se conecta al secundario del transformador (125 V), siendo este el punto de conexión común (pcc) entre la carga, la red y el SAPC. La carga contiene los fenómenos de desfase, distorsión, y desequilibrio.

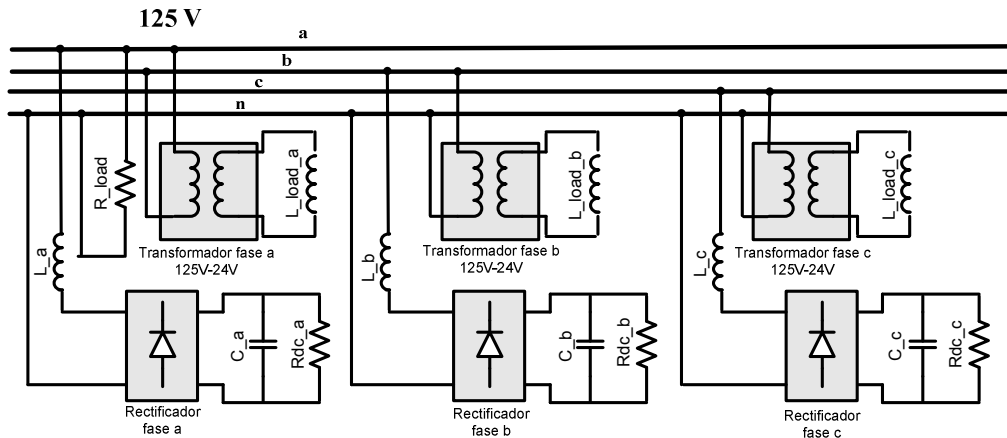


Figura 7-5. Carga trifásica utilizada en las pruebas del laboratorio.

El fenómeno de desfase de la carga fue implementado con ayuda de tres transformadores monofásicos de devanados 125 V – 24 V. El devanado primario se conecta a la tensión de 125 V. Mientras que en el devanado secundario se conectan una combinación serie-paralelo de bobinas (10 A y 3 mH para cada bobina). El transformador con carga inductiva es usado para aumentar la impedancia inductiva incrementando la demanda de potencia reactiva demandada por la carga. Los parámetros de esta carga fueron medidos y son resumidos en la siguiente tabla:

(Desfase) Transformador lineal.		
$S_{nominal} \approx 1000 \text{ VA}$		$f = 50 \text{ Hz}$
Devanado primario.		
$V_{rms} = 125 \text{ V}$	$r_{trafo_p} = 0.48 \Omega$	$l_{trafo_p} = 5.1 \text{ mH}$
Devanado secundario.		
$V_{rms} = 24 \text{ V}$	$r_{trafo_s} = 0.49 \Omega$	$l_{trafo_s} = 5.1 \text{ mH}$
Rama de magnetización.		

$r_{trafo_m}= 24200 \Omega$		$l_{trafo_m}= 64.19 \text{ H}$	
$L_load_a=2.48 \text{ mH}$	$L_load_b=2.48 \text{ mH}$	$L_load_c=2.57 \text{ mH}$	

Tabla 7-1. Carga inductiva equilibrada (Desfase).

El desequilibrio es ocasionado principalmente por la conexión de una resistencia en la fase *a* (R_load).

<i>°Desequilibrio (Resistencia en la fase a).</i>	
$R_load= 65.9 \Omega$	

Tabla 7-2. Carga resistiva desequilibrada

El fenómeno de distorsión fue implementado en cada fase utilizando un rectificador con carga R//C.

<i>(Distorsión) Rectificador + carga R//C.</i>		
$L_a=5.048 \text{ mH}$	$L_b=5.075 \text{ mH}$	$L_c=5.123 \text{ mH}$
$C_a =C_b=C_c=2200 \mu F$		$Rdc_a=Rdc_b=Rdc_c= 100 \Omega$

Tabla 7-3. Carga no lineal (Distorsión).

Estos parámetros son los mismos parámetros utilizados en la simulación para reproducir las condiciones de la carga del laboratorio.

9. Unidad de control. El control digital del SAPC se implementa mediante un DSP modelo TMS320F2812 de la casa Texas Instruments. El DSP se encarga de implementar todos los algoritmos que requiere el control del SAPC. El programa desarrollado en el DSP se encarga de obtener las corrientes de compensación del SAPC.

10. El equipo de medida externo utilizado para la obtención de las formas de onda y las medidas experimentales es el osciloscopio digital Lecroy wavejet 324. Para la correcta interpretación de las capturas del osciloscopio se debe tener en cuenta que las sondas de corriente ofrecen un ratio de conversión de 100mV/A. Las sondas de tensión atenúan x10, siendo las escalas reales de 50 V/div. Al no existir equipos de medida comerciales basados en la norma IEEE Std. 1459, los cálculos para la obtención de todas las magnitudes presentadas han sido implementados mediante un programa de cálculo usando Matlab-Guide, a partir de los datos registrados por el osciloscopio Lecroy wavejet 324. Los datos obtenidos se han agrupado en tablas igual que se agruparon en el capítulo anterior para los resultados de simulación. Estas tablas incluyen las medidas de los valores de las tensiones en el pcc, de las corrientes de línea y de neutro, las magnitudes de potencia en formato IEEE Std. 1459-2010, y las tasas de distorsión armónica total de tensiones y corrientes. Estas tasas se han calculado teniendo en cuenta los primeros 50 armónicos de las señales.

Los parámetros más importantes de la etapa de potencia y del sistema de control utilizados en los ensayos son:

- Tensión del bus dc: $V_{dc}=500\text{V}$, repartidos entre la parte alta y baja $V_{dc+}=V_{dc-}=250\text{V}$.
- Capacidad total del bus: $C = 7\text{mF}$, siendo las partes alta y baja del bus $C_1 = C_2=14.1\text{mF}$.
- Bobinas de salida del inversor: $L_A = L_B = L_C = 6\text{mH}$.
- Frecuencia de adquisición 6400 Hz.
- Frecuencia de conmutación 19200 Hz.
- Sincronización mediante la detección del cruce por cero de la fase A .

Los objetivos de los ensayos experimentales incluidos en este capítulo son los mismos objetivos de los ensayos de simulación. De hecho, Los resultados experimentales coinciden con los resultados de simulación del capítulo 6. Los objetivos son los siguientes:

- Comprobar y validar la estrategia de compensación global como estrategia de compensación para las corrientes ineficientes de la carga.
- Comprobar y validar la estrategia de compensación selectiva como estrategia de compensación para las corrientes ineficientes de la carga.
- Comprobar y validar la estrategia de compensación global modificada con limitación de potencia como estrategia de compensación para las corrientes ineficientes de la carga.
- Comprobar y validar la estrategia de compensación selectiva con limitación de potencia como estrategia de compensación para las corrientes ineficientes de la carga.
- Comprobar y validar la estrategia de compensación selectiva para la compensación de la corriente del neutro.

El capítulo se ha estructurado de acuerdo con los objetivos planteados y en el mismo orden que el que se han presentado.

7.1. Medición de la tensión del pcc.

La tensión de alimentación es senoidal y equilibrada. La carga y el SAPC se conectan a la red de distribución trifásica de 4 hilos (220 V, 50 Hz) a través de un transformador de 20 kVA configurable. Este transformador proporciona secundarios trifásicos de 80 V, 125 V, y 220 V. Para las pruebas realizadas se tomaron los devanados de 125 V. El sistema trifásico de tensiones de alimentación senoidales y equilibradas fueron medidas en el pcc y sus formas de onda se muestran en la figura 7-6.

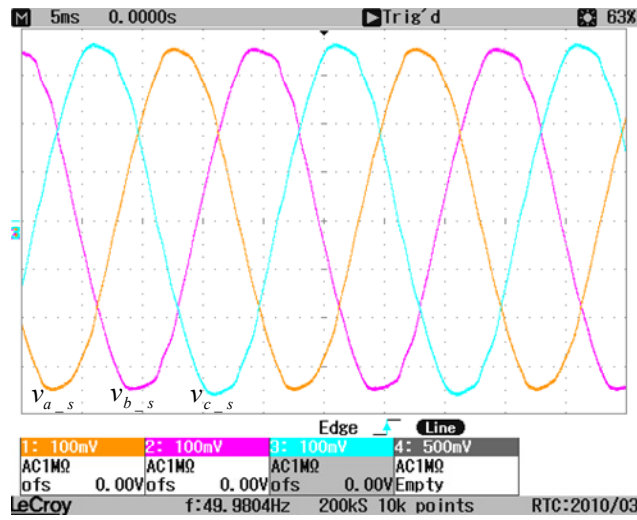


Figura 7-6. Tensiones de alimentación senoidales y equilibradas en el pcc.

En la siguiente tabla se incluyen las magnitudes de las tensiones de la red con el procedimiento de cálculo propuesto en la tesis.

$V_a = 125.46 \text{ V}$		$V_b = 126.82 \text{ V}$		$V_c = 129.26 \text{ V}$	
$V_{a1} = 125.44 \text{ V}$	$\alpha_{a1} = 0^\circ$	$V_{b1} = 126.78 \text{ V}$	$\alpha_{b1} = -120.35^\circ$	$V_{c1} = 129.23 \text{ V}$	$\alpha_{c1} = -239.74^\circ$
$V_1^+ = 127.15 \text{ V}$	$\alpha_1^+ = -0.03^\circ$	$V_1^- = 0.82 \text{ V}$	$\alpha_1^- = -124.38^\circ$	$V_1^0 = 1.45 \text{ V}$	$\alpha_1^0 = 149.23^\circ$
$V_{aH} = 2.45 \text{ V}$		$V_{bH} = 3.24 \text{ V}$		$V_{cH} = 3 \text{ V}$	
$V_{eH} = 127.19 \text{ V}$		$V_{e1\#} = 127.16 \text{ V}$		$V_{eH\#} = 2.92 \text{ V}$	
$THD_{V_a^*} = 1.95 \%$	$THD_{V_b^*} = 2.55 \%$	$THD_{V_c^*} = 2.36 \%$	$THD_{eV^*} = 2.30 \%$		

Tabla 7-4. Voltajes y THD_V 's de la red calculados mediante la propuesta de la tesis.

Como se puede apreciar a partir de los datos de la tabla 7-4, las tensiones de alimentación presentan una distorsión menor al 3 % y un leve desequilibrio. Con estos valores se puede considerar las tensiones de la red como sinusoidales y equilibradas.

7.2. Medición de la corriente de la carga.

La carga incluye los fenómenos de desequilibrio, de desfase, y de distorsión. Sus principales parámetros fueron resumidos en las tablas 7-1, 7-2, y 7-3. Esta carga fue alimentada mediante un sistema de tensiones trifásico senoidal de 125 V descrito en el punto anterior. Las formas de onda de las corrientes de la carga para las fases a , b , c y el neutro n se muestran en la figura 7-7.

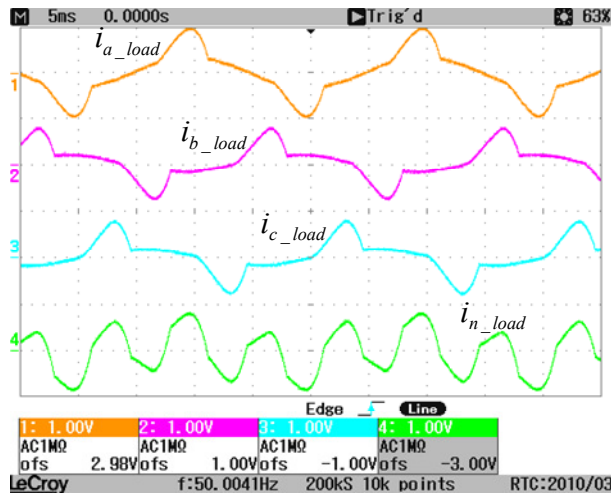


Figura 7-7. Corrientes de la carga.

La tabla 7-5 presenta las corrientes que suministra la red eléctrica tras la compensación.

$I_a = 4.83 \text{ A}$		$I_b = 3.54 \text{ A}$		$I_c = 3.52 \text{ A}$		$I_n = 4.8 \text{ A}$	
$I_{a1} = 4.52 \text{ A}$	$\beta_{a1} = -28.62^\circ$	$I_{b1} = 3.14 \text{ A}$	$\beta_{b1} = -166.18^\circ$	$I_{c1} = 3.08 \text{ A}$	$\beta_{c1} = -283.65^\circ$	$I_{n1} = 1.65 \text{ A}$	$\beta_{n1} = 2.59^\circ$
$I_1^+ = 3.54 \text{ A}$	$\beta_1^+ = -38.07^\circ$	$I_1^- = 0.63 \text{ A}$	$\beta_1^- = -0.45^\circ$	$I_1^0 = 0.55 \text{ A}$	$\beta_1^0 = 2.59^\circ$		
$I_{aH} = 1.7 \text{ A}$		$I_{bH} = 1.64 \text{ A}$		$I_{cH} = 1.71 \text{ A}$		$I_{nH} = 4.51 \text{ A}$	
$I_{eH} = 4.01 \text{ A}$		$I_{eV} = 3.64 \text{ A}$		$I_{eH\#} = 1.68 \text{ A}$			
$THD_{Ia^*} = 61.00 \%$		$THD_{Ib^*} = 58.85 \%$		$THD_{Ic^*} = 61.36 \%$		$THD_{In^*} = 60.28 \%$	

Tabla 7-5. Valores eficaces, desfases, y THD_i 's de las corrientes de la carga.

La tabla 7-6 presenta las potencias calculadas a partir de las tensiones y corrientes de la red.

$S_{e\#} = 1530.26 \text{ VA}$					
$S_{e1\#} = 1389.07 \text{ VA}$			$S_{eN\#} = 642.02 \text{ VA}$		
$S_1^+ = 1350.33 \text{ VA}$		$S_{U1\#} = 325.74 \text{ VA}$	$D_{eH\#} = 641.11 \text{ VA}$	$S_{eH\#} = 14.70 \text{ VA}$	$D_{eV\#} = 27.64 \text{ VA}$
$P_1^+ = 1063.06 \text{ W}$	$Q_1^+ = 832.64 \text{ var}$				
$S_{UV\#} = 17.69 \text{ VA}$	$S_{U1\#} = 325.23 \text{ VA}$	$S_{UUV\#} = 4.18 \text{ VA}$	$P_H = 3.07 \text{ W}$	$D_{eH\#} = 14.38 \text{ VA}$	
$P = 1064.29 \text{ W}$	$P_1 = 1061.2 \text{ W}$		$P_H = 3.07 \text{ W}$		
$P_a = 497.65 \text{ W}$	$P_b = 278.9 \text{ W}$		$P_c = 287.74 \text{ W}$		
$P_{a1} = 497.58 \text{ W}$	$P_{b1} = 277.32 \text{ W}$		$P_{c1} = 286.32 \text{ W}$		
$P_1^+ = 1064.05 \text{ W}$	$P_1^- = 0.86 \text{ W}$		$P_1^0 = 1.99 \text{ W}$		
$Q = 832.60 \text{ var}$	$Q_1 = 832.56 \text{ var}$		$Q_H = 9.09 \text{ var}$		
$P_{Fm} = 0.79$	$Q_1^- = 1.28 \text{ var}$		$Q_1^0 = 1.30 \text{ var}$		
$P_{F\#} = 0.70$	$P_{F1\#} = 0.76$		$P_{F1^+} = 0.79$		
$P_{FT\#} = 0.69$			$I_e = 4.87 \text{ A}$		

Tabla 7-6. Potencias y factores de mérito en la red para evaluar criterios en bornes de la carga antes de la compensación.

La potencia $S_{eH\#}$ es 14.70 VA y la potencia $D_{eV\#}$ es 27.64 VA, estas potencias, que en los resultados de simulación son cero, se deben a que la tensión en el pcc está levemente distorsionada. La potencia $S_{U1U\#}$ es 4.18 VA y la potencia $S_{U1V\#}$ es 17.69 VA, estos valores que en la simulación son cero se deben a que la tensión en el pcc es levemente asimétrica.

7.3. Pruebas experimentales conectando el SAPC.

A continuación se realizarán pruebas experimentales utilizando las diferentes estrategias de compensación. Se utilizará la ecuación (4.44) para seleccionar las corrientes ineficientes a compensar variando los coeficientes K_H , K_U , y K_Q de acuerdo a la estrategia de compensación elegida. La ecuación (4.44) es rescrita en la ecuación (7.1):

$$i_{z_SAPC_S} = K_H \cdot i_{zH_SAPC} + K_U \cdot i_{zU1_SAPC} + K_Q \cdot i_{z1_SAPC}^{++} = i_{zH_SAPC_S} + i_{zU1_SAPC_S} + i_{z1_SAPC_S}^{++} \quad (7.1)$$

En la sección 7.3.1 se validarán sin limitación de potencia:

- Las corrientes de compensación definidas en el capítulo 4.
- La compensación para cada corriente ineficiente de la carga.
- La compensación para dos corrientes ineficientes de la carga.
- La compensación para todas las corrientes ineficientes de la carga o estrategia de compensación G_T .

En la sección 7.3.2 se validarán las corrientes de compensación cuando existe limitación de potencia para las estrategias de compensación selectiva, para la estrategia de compensación G_L , y para la estrategia de compensación N.

7.3.1. Validación de las corrientes de compensación.

En esta sección se validarán mediante pruebas experimentales las corrientes de compensación definidas en el capítulo 4. Se validará que el SAPC mediante los algoritmos planteados sea capaz de compensar cada potencia ineficiente, la combinación de dos potencias ineficientes, y las tres potencias ineficientes en el extendido SAPC global verificando que cada corriente ineficiente inyectada elimine su respectiva potencia ineficiente y que dejan de ser suministradas por la red eléctrica.

7.3.1.1. Compensación de Q_1^+ .

En esta sección se muestran los resultados experimentales obtenidos tras la conexión del SAPC cuando se decide compensar únicamente Q_1^+ . Las potencias $S_{U1\#}$ y $S_{eN\#}$ no son compensadas. De acuerdo a esto, el SAPC asigna $K_Q=1$, $K_U=0$, $K_H=0$ a los coeficientes de escalado de las corrientes de compensación de la ecuación (7.1). Los resultados experimentales obtenidos mediante la compensación de Q_1^+ coinciden con los resultados de simulación de la sección

6.2.1.1. Las corrientes de compensación que inyecta el SAPC a la carga se muestran en la figura 7-8. Las corrientes que suministra la red eléctrica durante la conexión del SAPC se muestran en la figura 7-9.

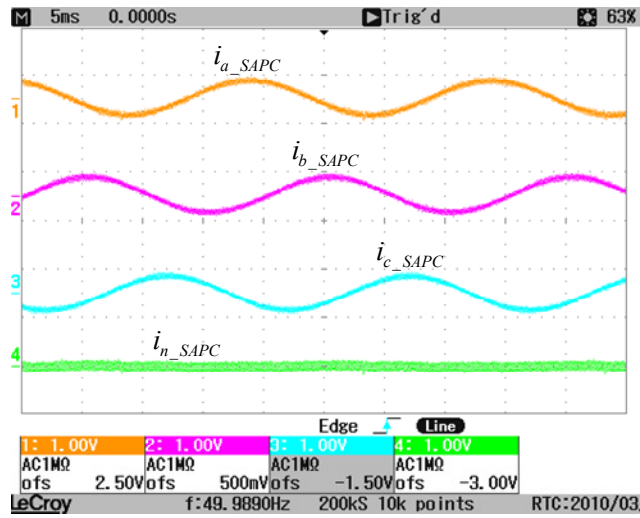


Figura 7-8. Corrientes de salida del SAPC y corriente del neutro cuando se compensa Q_1^+ .

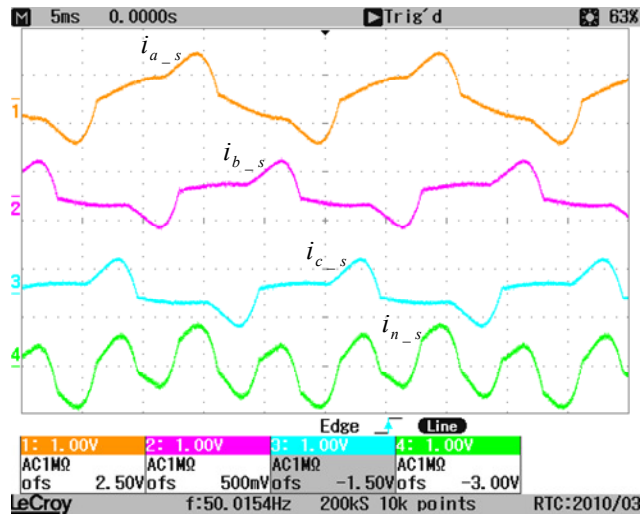


Figura 7-9. Corrientes en la red de suministro durante la compensación de Q_1^+ .

Las corrientes que suministra la red eléctrica calculadas con las expresiones propuestas en la tesis se muestran en la tabla 7-7.

$I_a = 5.16 \text{ A}$		$I_b = 3.41 \text{ A}$		$I_c = 3.43 \text{ A}$		$I_n = 5.02 \text{ A}$	
$I_{a1} = 4.87 \text{ A}$	$\beta_{a1} = 1.97^\circ$	$I_{b1} = 2.96 \text{ A}$	$\beta_{b1} = -118.25^\circ$	$I_{c1} = 2.93 \text{ A}$	$\beta_{c1} = -236.29^\circ$	$I_{n1} = 1.84 \text{ A}$	$\beta_{n1} = -0.08^\circ$
$I_1^+ = 3.59 \text{ A}$	$\beta_1^+ = 2.38^\circ$	$I_1^- = 0.67 \text{ A}$	$\beta_1^- = 1.61^\circ$	$I_1^0 = 0.61 \text{ A}$	$\beta_1^0 = -0.08^\circ$		
$I_{aH} = 1.72 \text{ A}$		$I_{bH} = 1.7 \text{ A}$		$I_{cH} = 1.78 \text{ A}$		$I_{nH} = 4.67 \text{ A}$	
$I_{eH} = 4.08 \text{ A}$		$I_{e1H} = 3.70 \text{ A}$		$I_{e1H} = 1.73 \text{ A}$			
$THD_{Ia^*} = 47.95 \%$		$THD_{Ib^*} = 47.39 \%$		$THD_{Ic^*} = 49.62 \%$		$THD_{In^*} = 48.23 \%$	

Tabla 7-7. Corrientes y THD_I 's en la red de suministro tras la compensación de Q_1^+ .

La tabla 7-8 presenta las magnitudes de potencia y los diferentes factores de análisis calculados a partir de los valores de las tensiones en el pcc y las corrientes suministradas por la red eléctrica durante la compensación.

$S_{e\#} = 1558.04 \text{ VA}$					
$S_{e1\#} = 1411.36 \text{ VA}$			$S_{eN\#} = 659.96 \text{ VA}$		
$S_1^+ = 1369.41 \text{ VA}$		$S_{U1\#} = 341.56 \text{ VA}$	$D_{eH\#} = 659.04 \text{ VA}$	$S_{eH\#} = 15.11 \text{ VA}$	$D_{eV\#} = 28.08 \text{ VA}$
$P_1^+ = 1368.22 \text{ W}$	$Q_1^+ = 56.87 \text{ var}$				
$S_{U1V\#} = 17.94 \text{ VA}$	$S_{U1I\#} = 341.06 \text{ VA}$	$S_{U1U\#} = 4.52 \text{ VA}$	$P_H = 3.41 \text{ W}$	$D_{eH\#} = 14.72 \text{ VA}$	
$P = 1366.44 \text{ W}$	$P_1 = 1362.99 \text{ W}$	$P_H = 3.41 \text{ W}$			
$P_a = 610.53 \text{ W}$	$P_b = 376.59 \text{ W}$	$P_c = 379.32 \text{ W}$			
$P_{a1} = 610.49 \text{ W}$	$P_{b1} = 374.76 \text{ W}$	$P_{c1} = 377.77 \text{ W}$			
$P_1^+ = 1366.25 \text{ W}$	$P_1^- = 0.97 \text{ W}$	$P_1^0 = 2.29 \text{ W}$			
$Q = 58.27 \text{ var}$	$Q_1 = 57.51 \text{ var}$	$Q_H = 9.37 \text{ var}$			
$P_{Fm} = 1$	$Q_1^- = 1.33 \text{ var}$	$Q_1^0 = 1.36 \text{ var}$			
$P_{F\#} = 0.87$	$P_{F1\#} = 0.97$	$P_{F1^+} = 1$			
$P_{FT\#} = 0.88$		$I_e = 5.01 \text{ A}$			

Tabla 7-8. Potencias y factores de mérito en la red (compensación de Q_1^+).

El SAPC genera unas corrientes ($I_{z1_SAPC}^{+r}$) para reducir en la red las corrientes reactivas demandadas por la carga, por lo que Q_1^+ es compensada. Cuando se compensa Q_1^+ , el SAPC no compensa las corrientes del neutro ya que las corrientes reactivas no circulan por el neutro, por lo que la corriente del neutro en la red no se reduce. Tras la compensación, la potencia reactiva Q_1^+ entregada por la red se reduce a 56.87 var. Como era esperable, tanto $S_{eN\#}$ como $S_{U1\#}$ permanecen prácticamente inalteradas durante la compensación. Se presenta un leve incremento de P_1^+ , debido a que el SAPC requiere potencia activa para mantener cargado el bus de continua y para satisfacer las pérdidas internas de los IGBT's ($\Delta P_1^+ = 305.16 \text{ W}$). Los THD_I 's disminuyen levemente a pesar de que las corrientes no fundamentales no son compensadas, esto se debe a que el SAPC demanda de la red eléctrica corriente activa fundamental de secuencia positiva. Con la compensación de Q_1^+ , se reducen $S_{e\#}$ y $S_{e1\#}$ por lo que $P_{F\#}$ y $P_{F1\#}$ aumentan. El factor de potencia P_{F1^+} es 1 debido a que $P_1^+ = S_1^+$, y el factor de

potencia total $P_{FT\#}$ aumenta pero no alcanza a ser 1 debido a que $S_{e\#}$, tras la compensación, aún incluye a $S_{U1\#}$ y $S_{eN\#}$.

7.3.1.2. Compensación de $S_{U1\#}$.

En esta sección se muestran los resultados experimentales obtenidos tras la conexión del SAPC cuando se decide compensar únicamente $S_{U1\#}$, las potencias Q_1^+ y $S_{eN\#}$ no son compensadas. De acuerdo a esto, El SAPC asigna $K_U=1$, $K_Q=0$, $K_H=0$ a los coeficientes de escalado de las corrientes de compensación de la ecuación (7.1). Los resultados experimentales obtenidos mediante la compensación de $S_{U1\#}$ coinciden con los resultados de simulación de la sección 6.2.1.2. Las corrientes de compensación que inyecta el SAPC a la carga se muestran en la figura 7-10. Las corrientes que suministra la red eléctrica durante la conexión del SAPC se muestran en la figura 7-11.

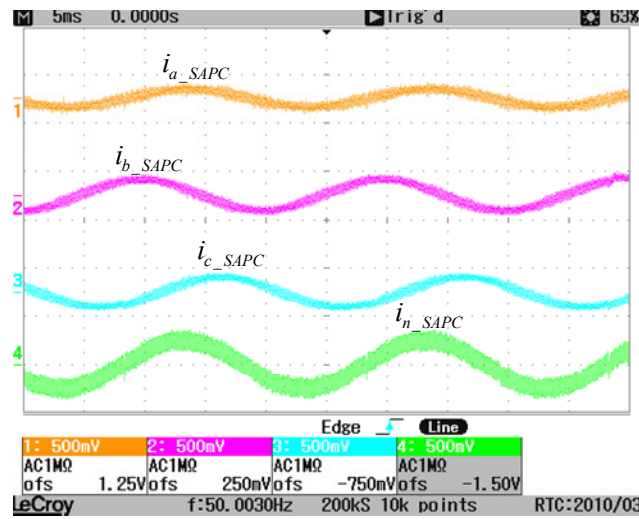


Figura 7-10. Corrientes de salida del SAPC y corriente del neutro cuando se compensa $S_{U1\#}$.

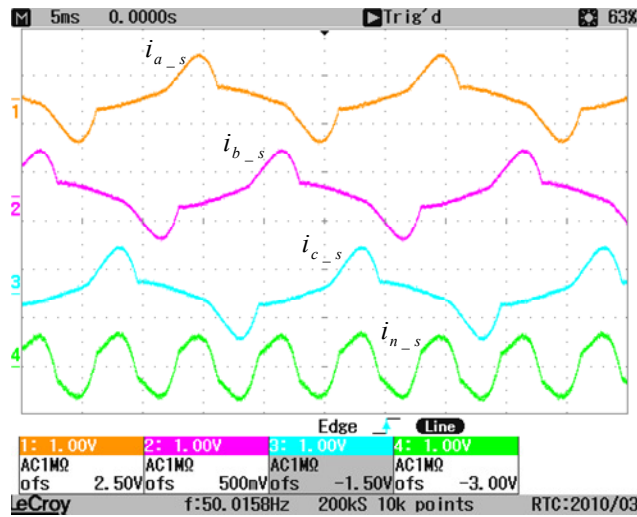


Figura 7-11. Corrientes en la red de suministro durante la compensación de $S_{U1\#}$.

La tabla 7-9 presenta las corrientes que suministra la red eléctrica tras la compensación.

$I_a = 4.36 \text{ A}$		$I_b = 4.46 \text{ A}$		$I_c = 4.46 \text{ A}$		$I_n = 4.7 \text{ A}$	
$I_{a1} = 4.01 \text{ A}$	$\beta_{a1} = -31.08^\circ$	$I_{b1} = 4.12 \text{ A}$	$\beta_{b1} = -153.13^\circ$	$I_{c1} = 4.08 \text{ A}$	$\beta_{c1} = -273.1^\circ$	$I_{n1} = 0.15 \text{ A}$	$\beta_{n1} = -262.42^\circ$
$I_1^+ = 4.07 \text{ A}$	$\beta_1^+ = -32.45^\circ$	$I_1^- = 0.07 \text{ A}$	$\beta_1^- = 85.11^\circ$	$I_1^0 = 0.05 \text{ A}$	$\beta_1^0 = 97.58^\circ$		
$I_{aH} = 1.72 \text{ A}$		$I_{bH} = 1.72 \text{ A}$		$I_{cH} = 1.79 \text{ A}$		$I_{nH} = 4.69 \text{ A}$	
$I_{eH} = 4.43 \text{ A}$		$I_{e1H} = 4.07 \text{ A}$		$I_{e2H} = 1.74 \text{ A}$			
$THD_{Ia^*} = 50.07 \%$		$THD_{Ib^*} = 50.07 \%$		$THD_{Ic^*} = 52.12 \%$		$THD_{In^*} = 50.66 \%$	

Tabla 7-9. Corrientes y THD_i 's en la red de suministro tras la compensación de $S_{U1\#}$.

La tabla 7-10 presenta las magnitudes de potencia y los diferentes factores de análisis calculados a partir de las tensiones en el pcc y las corrientes de la red eléctrica.

$S_{e\#} = 1689.18 \text{ VA}$					
$S_{e1\#} = 1552.72 \text{ VA}$			$S_{eN\#} = 665.12 \text{ VA}$		
$S_1^+ = 1552.50 \text{ VA}$		$S_{U1\#} = 25.84 \text{ VA}$	$D_{e1\#} = 664.06 \text{ VA}$	$S_{eH\#} = 15.22 \text{ VA}$	$D_{eV\#} = 30.89 \text{ VA}$
$P_1^+ = 1310.09 \text{ W}$	$Q_1^+ = 833.02 \text{ var}$				
$S_{U1V\#} = 20.33 \text{ VA}$	$S_{U1H\#} = 15.93 \text{ VA}$	$S_{U1U\#} = 0.43 \text{ VA}$	$P_H = 3.02 \text{ W}$	$D_{eH\#} = 14.92 \text{ VA}$	
$P = 1312.73 \text{ W}$	$P_1 = 1309.67 \text{ W}$		$P_H = 3.02 \text{ W}$		
$P_a = 430.47 \text{ W}$	$P_b = 440.28 \text{ W}$		$P_c = 441.98 \text{ W}$		
$P_{a1} = 430.43 \text{ W}$	$P_{b1} = 438.71 \text{ W}$		$P_{c1} = 440.57 \text{ W}$		
$P_1^+ = 1309.68 \text{ W}$	$P_1^- = -0.14 \text{ W}$		$P_1^0 = 0.13 \text{ W}$		
$Q = 833.23 \text{ var}$	$Q_1 = 833.05 \text{ var}$		$Q_H = 9.44 \text{ var}$		
$P_{Fm} = 0.84$	$Q_1^- = 0.08 \text{ var}$		$Q_1^0 = 0.17 \text{ var}$		
$P_{F\#} = 0.78$	$P_{F1\#} = 0.84$		$P_{F1^+} = 0.84$		
$P_{FT\#} = 0.78$			$I_e = 5.19 \text{ A}$		

Tabla 7-10. Potencias y factores de mérito en la red (compensación de $S_{U1\#}$).

El SAPC genera unas corrientes ($I_{z_{U1_SAPC}}$) para reducir en la red las corrientes de desequilibrio demandadas por la carga, por lo que $S_{U1\#}$ es compensada. El SAPC reduce las corrientes de neutro fundamentales, por lo que la corriente del neutro en la red contiene sólo componentes no fundamentales. La potencia de desequilibrio fundamental $S_{U1\#}$ entregada por la red se reduce a 25.84 VA. Tanto $S_{eN\#}$ como Q_1^+ permanecen prácticamente inalteradas durante la compensación. Se presenta un leve incremento de P_1^+ , esto se debe a que el SAPC requiere potencia activa para mantener cargado el bus de continua y para satisfacer las pérdidas internas de los IGBT's ($\Delta P_1^+=247.03$ W). La demanda de potencia activa por fase se equilibra tras la compensación. Los THD_j 's disminuyen levemente a pesar de que las corrientes no fundamentales no son compensadas, esto se debe a que el SAPC demanda de la red eléctrica corriente activa fundamental de secuencia positiva. Con la compensación de $S_{U1\#}$, el factor de potencia $P_{F1\#}$ aumenta levemente debido a que P_1^+ aumenta, su variación no es muy grande debido a que en este caso $S_{U1\#}$ no tiene componentes importantes de P_1^- , y P_1^0 . El factor de potencia P_{F1}^+ aumenta levemente debido al incremento de P_1^+ y S_1^+ a pesar de que Q_1^+ no es compensada. El factor de potencia $P_{F\#}$ y el factor de potencia total $P_{FT\#}$ mejoran ligeramente.

7.3.1.3. Compensación de $S_{eN\#}$.

En esta sección se muestran los resultados experimentales obtenidos tras la conexión del SAPC cuando se decide compensar únicamente $S_{eN\#}$, las potencias Q_1^+ y $S_{U1\#}$ no son compensadas. De acuerdo a esto, El SAPC asigna $K_H=1$, $K_Q=0$, $K_U=0$ a los coeficientes de escalado de las corrientes de compensación de la ecuación (7.1). Los resultados experimentales obtenidos mediante la compensación de $S_{eN\#}$ coinciden con los resultados de simulación de la sección 6.2.1.3 Las corrientes de compensación que inyecta el SAPC a la carga se muestran en la figura 7-12. Las corrientes que suministra la red durante la conexión del SAPC se muestran en la figura 7-13.

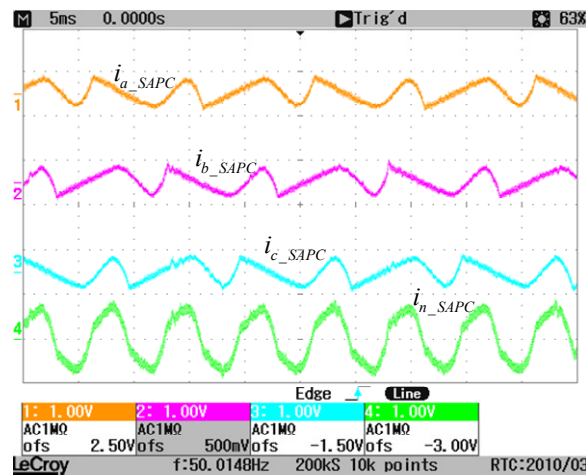


Figura 7-12. Corrientes de salida del SAPC y corriente del neutro cuando se compensa $S_{eN\#}$.

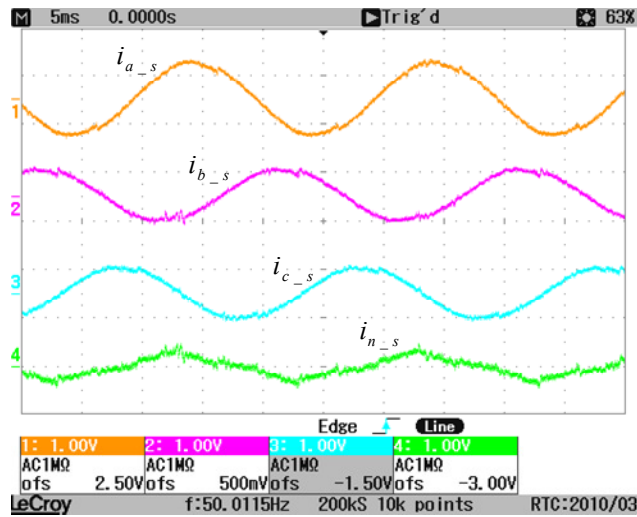


Figura 7-13. Corrientes en la red de suministro durante la compensación de $S_{eN\#}$.

La tabla 7-11 presenta las corrientes que suministra la red eléctrica tras la compensación.

$I_a = 5.23 \text{ A}$		$I_b = 3.67 \text{ A}$		$I_c = 3.67 \text{ A}$		$I_n = 1.7 \text{ A}$	
$I_{a1} = 5.23 \text{ A}$	$\beta_{a1} = -24.68^\circ$	$I_{b1} = 3.66 \text{ A}$	$\beta_{b1} = -156.43^\circ$	$I_{c1} = 3.67 \text{ A}$	$\beta_{c1} = -274.81^\circ$	$I_{n1} = 1.69 \text{ A}$	$\beta_{n1} = 0.23^\circ$
$I_1^+ = 4.17 \text{ A}$	$\beta_1^+ = -31.07^\circ$	$I_1^- = 0.61 \text{ A}$	$\beta_1^- = -3.03^\circ$	$I_1^0 = 0.56 \text{ A}$	$\beta_1^0 = 0.23^\circ$		
$I_{aH} = 0.09 \text{ A}$		$I_{bH} = 0.21 \text{ A}$		$I_{cH} = 0.06 \text{ A}$		$I_{nH} = 0.2 \text{ A}$	
$I_{e\#} = 4.25 \text{ A}$		$I_{e1\#} = 4.25 \text{ A}$		$I_{eH\#} = 0.14 \text{ A}$			
$THD_{Ia^*} = 1.89 \%$		$THD_{Ib^*} = 4.41 \%$		$THD_{Ic^*} = 1.26 \%$		$THD_{In^*} = 2.95 \%$	

Tabla 7-11. Corrientes y THD_I 's de la red tras la compensación de $S_{eN\#}$.

La tabla 7-12 presenta las potencias calculadas a partir de las tensiones y las corrientes de la red eléctrica.

$S_{e\#} = 1625.41 \text{ VA}$					
$S_{e1\#} = 1622.82 \text{ VA}$			$S_{eN\#} = 91.59 \text{ VA}$		
$S_1^+ = 1590.64 \text{ VA}$		$S_{U1\#} = 321.59 \text{ VA}$	$D_{eH\#} = 84.49 \text{ VA}$	$S_{eH\#} = 1.93 \text{ VA}$	$D_{eV\#} = 32.29 \text{ VA}$
$P_1^+ = 1362.44 \text{ W}$	$Q_1^+ = 820.91 \text{ var}$				
$S_{U1V\#} = 20.83 \text{ VA}$	$S_{U1H\#} = 320.89 \text{ VA}$	$S_{U1U1\#} = 4.14 \text{ VA}$	$P_H = -0.25 \text{ W}$		$D_{eH\#} = 1.93 \text{ VA}$
$P = 1358.75 \text{ W}$	$P_1 = 1360.07 \text{ W}$		$P_H = -0.25 \text{ W}$		
$P_a = 595.41 \text{ W}$	$P_b = 375.48 \text{ W}$		$P_c = 387.87 \text{ W}$		
$P_{a1} = 595.76 \text{ W}$	$P_{b1} = 376.12 \text{ W}$		$P_{c1} = 388.22 \text{ W}$		
$P_1^+ = 1362.96 \text{ W}$	$P_1^- = -0.78 \text{ W}$		$P_1^0 = -2.1 \text{ W}$		
$Q = 821.02 \text{ var}$	$Q_1 = 820.98 \text{ var}$		$Q_H = 0.08 \text{ var}$		
$P_{Fm} = 0.86$	$Q_1^- = 1.28 \text{ var}$		$Q_1^0 = 1.26 \text{ var}$		
$P_{F\#} = 0.84$	$P_{F1\#} = 0.84$		$P_{F1^+} = 0.86$		
$P_{FT\#} = 0.84$			$I_e = 4.37 \text{ A}$		

Tabla 7-12. Potencias y factores de mérito en la red (compensación de $S_{eN\#}$).

El SAPC genera unas corrientes (I_{zH_SAPC}) para reducir en la red las corrientes no fundamentales demandadas por la carga, por lo que $S_{eN\#}$ es compensada. Cuando se compensa $S_{eN\#}$, el SAPC reduce las corrientes no fundamentales del neutro, por lo que la corriente del neutro en la red contiene sólo componentes fundamentales. La potencia aparente efectiva no fundamental $S_{eN\#}$ entregada por la red se reduce a 91.59 VA. La potencia $D_{eI\#}$ se reduce a 84.49 VA, la potencia $S_{eH\#}$ se reduce a 1.93 VA. $D_{eI\#}$ y $S_{eH\#}$ son parte de $S_{eN\#}$ y se reducen debido a que dependen de las corrientes no fundamentales, mientras que la potencia $D_{eV\#}$ que no depende de las corrientes no fundamentales permanece prácticamente igual. Tanto Q_1^+ como $S_{U1\#}$ permanecen prácticamente inalteradas durante la compensación. La potencia aparente efectiva $S_{e\#}$ se reduce gracias a que la red deja de suministrar corrientes no fundamentales. Se presenta un leve incremento de P_1^+ , esto se debe a que el SAPC requiere potencia activa para mantener cargado el bus de continua y para satisfacer las pérdidas internas de los IGBT's ($\Delta P_1^+=299.38$ W). Los THD_I 's se reducen considerablemente indicando que no existen componentes importantes de corriente no fundamental en la red. Con la compensación de $S_{eN\#}$, el factor de potencia $P_{F\#}$ y el factor de potencia total $P_{FT\#}$ aumentan pues la red suministra menos $S_{e\#}$, mientras que los factores de potencia $P_{F1\#}$ y P_{F1}^+ aumentan levemente debido a que aumenta P_1^+ y a pesar de que Q_1^+ y $S_{U1\#}$ no son compensadas.

7.3.1.4. Compensación conjunta de Q_1^+ y $S_{U1\#}$.

En esta sección se muestran los resultados experimentales obtenidos tras la conexión del SAPC cuando se decide compensar Q_1^+ y $S_{U1\#}$. La potencia $S_{eN\#}$ no es compensada. De acuerdo a esto, el SAPC asigna $K_Q=1$, $K_U=1$, $K_H=0$ a los coeficientes de escalado de las corrientes de compensación de la ecuación (7.1). Los resultados experimentales obtenidos mediante la compensación de Q_1^+ y $S_{U1\#}$ coinciden con los resultados de simulación de la sección 6.2.1.4. Las corrientes de compensación que inyecta el SAPC a la carga se muestran en la figura 7-14. Las corrientes que suministra la red eléctrica durante la conexión del SAPC se muestran en la figura 7-15.

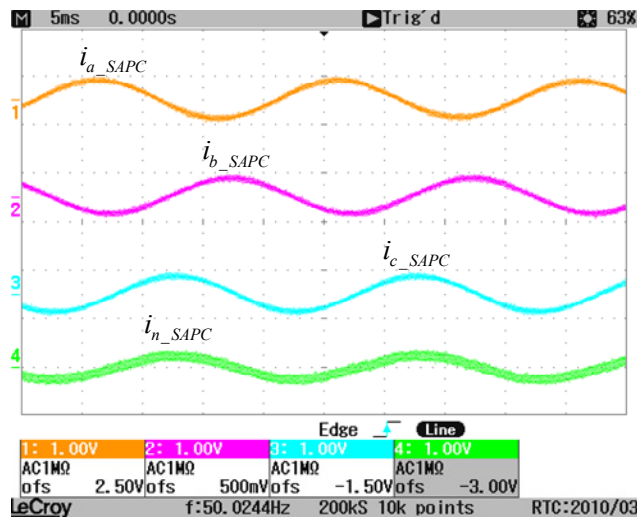


Figura 7-14. Corrientes de salida del SAPC y corriente del neutro cuando se compensa Q_1^+ y $S_{U1\#}$.

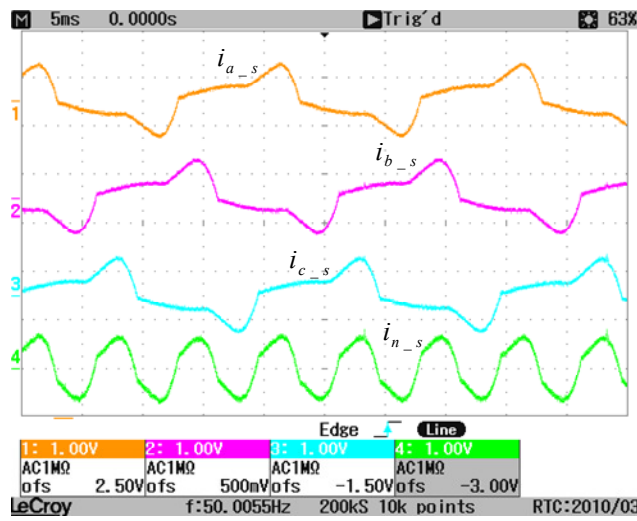


Figura 7-15. Corrientes en la red de suministro durante la compensación de Q_1^+ y $S_{U1\#}$.

Las corrientes que suministra la red eléctrica calculadas con las expresiones propuestas en la tesis se muestran en la tabla 7-13.

$I_a = 3.93 \text{ A}$		$I_b = 3.93 \text{ A}$		$I_c = 3.8 \text{ A}$		$I_n = 4.6 \text{ A}$	
$I_{a1} = 3.53 \text{ A}$	$\beta_{a1} = 3.79^\circ$	$I_{b1} = 3.56 \text{ A}$	$\beta_{b1} = -117.69^\circ$	$I_{c1} = 3.38 \text{ A}$	$\beta_{c1} = -237.65^\circ$	$I_{n1} = 0.09 \text{ A}$	$\beta_{n1} = -49.55^\circ$
$I_1^+ = 3.49 \text{ A}$	$\beta_1^+ = 2.82^\circ$	$I_1^- = 0.09 \text{ A}$	$\beta_1^- = 78.95^\circ$	$I_1^0 = 0.03 \text{ A}$	$\beta_1^0 = -49.55^\circ$		
$I_{aH} = 1.74 \text{ A}$		$I_{bH} = 1.66 \text{ A}$		$I_{cH} = 1.74 \text{ A}$		$I_{nH} = 4.6 \text{ A}$	
$I_{eH} = 3.89 \text{ A}$			$I_{e1\#} = 3.49 \text{ A}$			$I_{eH\#} = 1.71 \text{ A}$	
$THD_{Ia^*} = 49.91 \%$		$THD_{Ib^*} = 47.62 \%$		$THD_{Ic^*} = 49.91 \%$		$THD_{In^*} = 49.05 \%$	

Tabla 7-13. Corrientes y THD_i 's de la red tras la compensación de Q_1^+ y $S_{U1\#}$.

La tabla 7-14 presenta las magnitudes de potencia y los diferentes factores de análisis calculados a partir de los valores de las tensiones en el pcc y las corrientes suministradas por la red eléctrica durante la compensación.

$S_{e\#} = 1483.22 \text{ VA}$					
$S_{e1\#} = 1331.70 \text{ VA}$		$S_{eN\#} = 653.07 \text{ VA}$			
$S_1^+ = 1331.26 \text{ VA}$		$S_{U1\#} = 34.23 \text{ VA}$	$D_{e1\#} = 652.23 \text{ VA}$	$S_{eH\#} = 14.95 \text{ VA}$	$D_{eV\#} = 26.50 \text{ VA}$
$P_1^+ = 1329.64 \text{ W}$	$Q_1^+ = 65.49 \text{ var}$				
$S_{U1V\#} = 17.44 \text{ VA}$	$S_{U1H\#} = 29.45 \text{ VA}$	$S_{U1U\#} = 0.47 \text{ VA}$	$P_H = 3.11 \text{ W}$		$D_{eH\#} = 14.62 \text{ VA}$
$P = 1331.26 \text{ W}$	$P_1 = 1328.11 \text{ W}$		$P_H = 3.11 \text{ W}$		
$P_a = 441.35 \text{ W}$	$P_b = 452.44 \text{ W}$		$P_c = 437.48 \text{ W}$		
$P_{a1} = 441.31 \text{ W}$	$P_{b1} = 450.82 \text{ W}$		$P_{c1} = 436.02 \text{ W}$		
$P_1^+ = 1328.43 \text{ W}$	$P_1^- = -0.19 \text{ W}$		$P_1^0 = -0.12 \text{ W}$		
$Q = 66.78 \text{ var}$	$Q_1 = 66.15 \text{ var}$		$Q_H = 9.21 \text{ var}$		
$P_{Fm} = 1$	$Q_1^- = 0.08 \text{ var}$		$Q_1^0 = 0.04 \text{ var}$		
$P_{F\#} = 0.90$	$P_{F1\#} = 1$		$P_{F1}^+ = 1$		
$P_{FT\#} = 0.90$			$I_e = 4.71 \text{ A}$		

Tabla 7-14. Potencias y factores de mérito en la red de suministro (compensación de Q_1^+ y $S_{U1\#}$).

El SAPC genera las corrientes de compensación para reducir las corrientes de desequilibrio y el desfase (I_{zU1_SAPC} e $I_{z1_SAPC}^{+r}$) demandadas por la carga, la red eléctrica se libera de tener que entregar estas corrientes. Cuando se compensa Q_1^+ , y $S_{U1\#}$, el SAPC reduce las corrientes de neutro fundamentales, por lo que la corriente del neutro en la red contiene sólo componentes no fundamentales. Las potencias Q_1^+ y $S_{U1\#}$ entregadas por la red de suministro se reducen a 65.49 var y 34.23 VA respectivamente. La potencia $S_{eN\#}$ permanece prácticamente inalterada durante la compensación. Se presenta un leve incremento de P_1^+ , esto se debe a que el SAPC requiere potencia activa para mantener cargado el bus de continua y para satisfacer las pérdidas internas de los IGBT's ($\Delta P_1^+ = 266.58 \text{ W}$). Los THD_I 's disminuyen levemente a pesar de que las corrientes no fundamentales no son compensadas, esto se debe a que el SAPC demanda de la red eléctrica corriente activa fundamental de secuencia positiva. La demanda de potencia activa por fase se equilibra tras la compensación. Con la compensación de Q_1^+ y con valores muy bajos de P_1^- e P_1^0 , se cumple que $P_1^+ \approx P_1 \approx S_1^+$ y por eso $P_{F1\#} = P_{F1}^+ = 1$. El factor de potencia $P_{F\#}$ y el factor de potencia total $P_{FT\#}$ aumentan pero no alcanzan a ser 1, esto se debe a que $S_{e\#}$, tras la compensación, aún incluye a $S_{eN\#}$.

7.3.1.5. Compensación conjunta de $S_{U1\#}$ y $S_{eN\#}$.

En esta sección se muestran los resultados experimentales obtenidos tras la conexión del SAPC cuando se decide compensar $S_{U1\#}$ y $S_{eN\#}$, y la potencia Q_1^+ no es compensada. De acuerdo a esto, El SAPC asigna $K_U=1$, $K_H=1$, $K_Q=0$ a los coeficientes de escalado de las corrientes de compensación de la ecuación (7.1). Los resultados experimentales obtenidos mediante la

compensación de $S_{U\#}$ y $S_{eN\#}$ coinciden con los resultados de simulación de la sección 6.2.1.5. Las corrientes de compensación que inyecta el SAPC a la carga se muestran en la figura 7-16. Las corrientes que suministra la red durante la conexión del SAPC se muestran en la figura 7-17.

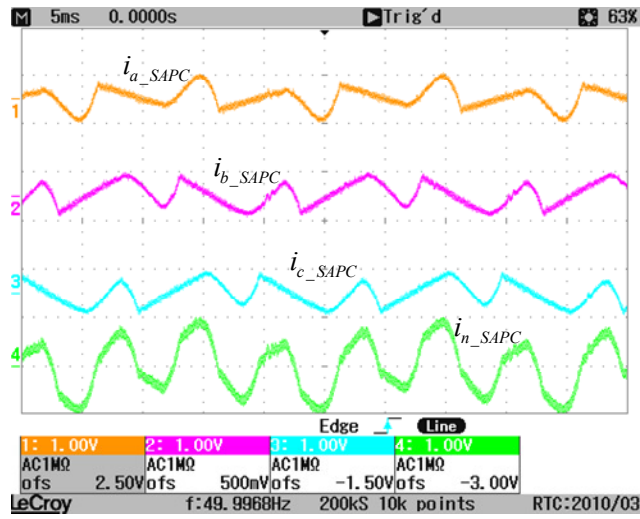


Figura 7-16. Corrientes de salida del SAPC y corriente del neutro cuando se compensa $S_{U\#}$ y $S_{eN\#}$.

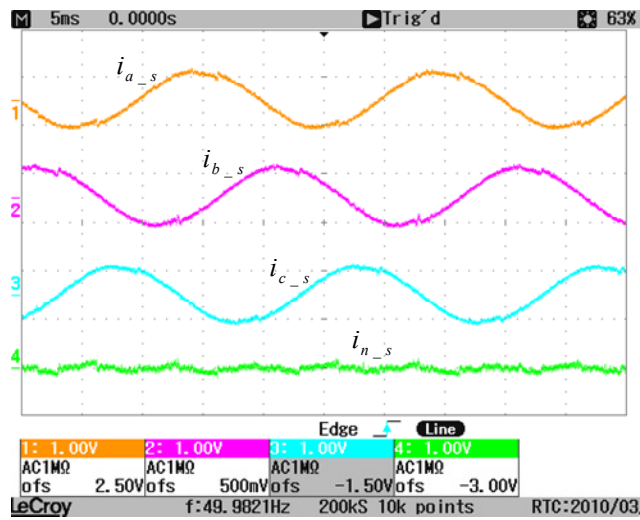


Figura 7-17. Corrientes en la red de suministro durante la compensación de $S_{U\#}$ y $S_{eN\#}$.

Las corrientes que suministra la red eléctrica calculadas con las expresiones propuestas en la tesis se muestran en la tabla 7-15.

$I_a = 4.09 \text{ A}$		$I_b = 4.12 \text{ A}$		$I_c = 4.1 \text{ A}$		$I_n = 0.3 \text{ A}$	
$I_{a1} = 4.09 \text{ A}$	$\beta_{a1} = -30.97^\circ$	$I_{b1} = 4.11 \text{ A}$	$\beta_{b1} = -152.39^\circ$	$I_{c1} = 4.1 \text{ A}$	$\beta_{c1} = -271.3^\circ$	$I_{n1} = 0.1 \text{ A}$	$\beta_{n1} = -243.31^\circ$
$I_1^+ = 4.1 \text{ A}$	$\beta_1^+ = -31.56^\circ$	$I_1^- = 0.03 \text{ A}$	$\beta_1^- = 24.44^\circ$	$I_1^0 = 0.03 \text{ A}$	$\beta_1^0 = 116.69^\circ$		
$I_{aH} = 0.08 \text{ A}$		$I_{bH} = 0.23 \text{ A}$		$I_{cH} = 0.02 \text{ A}$		$I_{nH} = 0.28 \text{ A}$	
$I_{eH} = 4.1 \text{ A}$		$I_{e1\#} = 4.1 \text{ A}$		$I_{eH\#} = 0.14 \text{ A}$			
$THD_{Ia^*} = 2.29 \%$		$THD_{Ib^*} = 6.58 \%$		$THD_{Ic^*} = 0.57 \%$		$THD_{In^*} = 4.01 \%$	

Tabla 7-15. Corrientes y THD_{I^*} 's de la red tras la compensación de $S_{U1\#}$ y $S_{eN\#}$.

La tabla 7-16 presenta las magnitudes de potencia y los diferentes factores de análisis calculados a partir de los valores de las tensiones en el pcc y las corrientes suministradas por la red eléctrica durante la compensación.

$S_{e\#} = 1565.71 \text{ VA}$					
$S_{e1\#} = 1564.07 \text{ VA}$			$S_{eN\#} = 71.76 \text{ VA}$		
$S_1^+ = 1563.94 \text{ VA}$		$S_{U1\#} = 19.55 \text{ VA}$	$D_{eH\#} = 63.17 \text{ VA}$	$S_{eH\#} = 1.45 \text{ VA}$	$D_{eV\#} = 31.12 \text{ VA}$
$P_1^+ = 1332.63 \text{ W}$	$Q_1^+ = 818.55 \text{ var}$				
$S_{U1V\#} = 19.53 \text{ VA}$	$S_{U1I\#} = 0.1 \text{ VA}$	$S_{U1U\#} = 0.21 \text{ VA}$	$P_H = -0.25 \text{ W}$	$D_{eH\#} = 1.45 \text{ VA}$	
$P = 1331.22 \text{ W}$	$P_1 = 1332.69 \text{ W}$		$P_H = -0.25 \text{ W}$		
$P_a = 438.92 \text{ W}$	$P_b = 441.1 \text{ W}$		$P_c = 451.2 \text{ W}$		
$P_{a1} = 439.37 \text{ W}$	$P_{b1} = 441.73 \text{ W}$		$P_{c1} = 451.63 \text{ W}$		
$P_1^+ = 1332.62 \text{ W}$	$P_1^- = -0.06 \text{ W}$		$P_1^0 = 0.13 \text{ W}$		
$Q = 818.70 \text{ var}$	$Q_1 = 818.63 \text{ var}$		$Q_H = 0.07 \text{ var}$		
$P_{Fm} = 0.85$	$Q_1^- = 0.04 \text{ var}$		$Q_1^0 = 0.08 \text{ var}$		
$P_{F\#} = 0.85$	$P_{F1\#} = 0.85$		$P_{F1^+} = 0.85$		
$P_{FT\#} = 0.85$			$I_e = 4.1 \text{ A}$		

Tabla 7-16. Potencias y factores de mérito en la red de suministro (compensación de $S_{U1\#}$ y $S_{eN\#}$).

El SAPC genera las corrientes de compensación para reducir las corrientes de desequilibrio y de distorsión (I_{zU1_SAPC} e I_{zH_SAPC}) demandadas por la carga, la red eléctrica se libera de tener que entregar estas corrientes. Cuando se compensa $S_{U1\#}$ y $S_{eN\#}$, el SAPC reduce las corrientes de neutro fundamentales y no fundamentales, la corriente del neutro en la red es reducida totalmente. Las potencias $S_{U1\#}$ y $S_{eN\#}$ entregadas por la red se reducen a 19.55 VA y 71.76 VA respectivamente. Prácticamente toda la $S_{U1V\#}$ es $S_{U1\#}$, esto se debe a la asimetría de la tensión en el pcc y que las corrientes fundamentales se encuentran equilibradas. La potencia $D_{eH\#}$ se reduce a 63.17 VA, la potencia $S_{eH\#}$ se reduce a 1.45 VA. $D_{eH\#}$ y $S_{eH\#}$ son parte de $S_{eN\#}$ y se reducen debido a que dependen de V_{eH} impuesta por la red en el pcc, mientras que la potencia $D_{eV\#}$ que no depende de la corriente no fundamental permanece prácticamente igual. La potencia Q_1^+ permanece prácticamente inalterada durante la compensación. Se presenta un leve incremento de P_1^+ , esto se debe a que el SAPC requiere potencia activa para mantener cargado

el bus de continua y para satisfacer las pérdidas internas de los IGBT's ($\Delta P_1^+ = 269.57$ W). La demanda de potencia activa por fase se equilibra tras la compensación. Los THD_I 's se reducen notablemente indicando que no existen componentes importantes de corriente no fundamental en la red. Con la compensación de $S_{U1\#}$, el factor de potencia $P_{F1\#}$ aumenta levemente debido a que P_1^+ aumenta, su variación no es muy grande debido a que en este caso $S_{U1\#}$ no tiene componentes importantes de P_1^- , e P_1^0 . El factor de potencia P_{F1}^+ aumenta levemente debido al incremento de P_1^+ y S_1^+ . El factor de potencia $P_{F\#}$ y el factor $P_{FT\#}$ mejoran considerablemente. Esto se debe a que la compensación de $S_{U1\#}$ y $S_{eN\#}$ ocasionan la disminución de $S_{e\#}$.

7.3.1.6. Compensación conjunta de Q_1^+ y $S_{eN\#}$.

En esta sección se muestran los resultados experimentales obtenidos tras la conexión del SAPC cuando se decide compensar Q_1^+ y $S_{eN\#}$, y la potencia $S_{U1\#}$ no es compensada. De acuerdo a esto, el SAPC asigna $K_Q=1$, $K_H=1$, $K_U=0$ a los coeficientes de escalado de las corrientes de compensación de la ecuación (7.1). Los resultados experimentales obtenidos mediante la compensación de Q_1^+ y $S_{eN\#}$ coinciden con los resultados de simulación de la sección 6.2.1.6. Las corrientes de compensación que inyecta el SAPC a la carga se muestran en la figura 7-18. Las corrientes que suministra la red durante la conexión del SAPC se muestran en la figura 7-19.

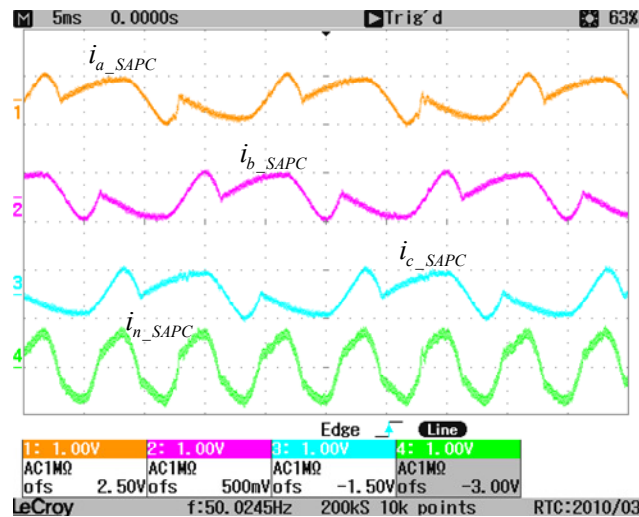


Figura 7-18. Corrientes de salida del SAPC y corriente del neutro cuando se compensa Q_1^+ y $S_{eN\#}$.

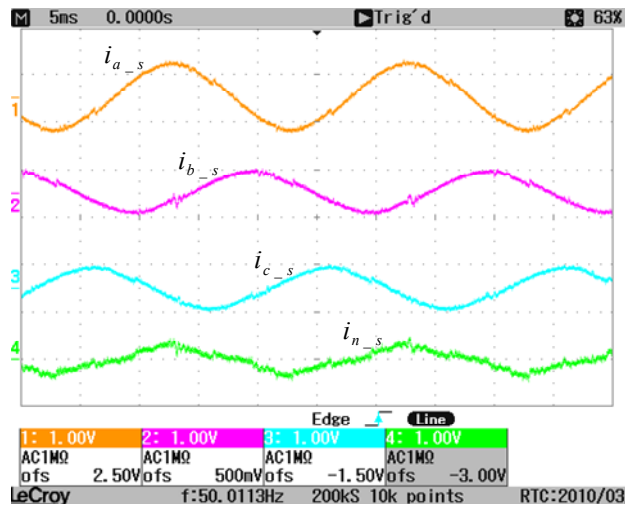


Figura 7-19. Corrientes de red durante la compensación de Q_1^+ y $S_{eN\#}$.

La tabla 7-17 presenta las corrientes que suministra la red eléctrica tras la compensación.

$I_a = 4.84 \text{ A}$		$I_b = 2.91 \text{ A}$		$I_c = 2.92 \text{ A}$		$I_n = 1.84 \text{ A}$	
$I_{a1} = 4.84 \text{ A}$	$\beta_{a1} = 1.38^\circ$	$I_{b1} = 2.9 \text{ A}$	$\beta_{b1} = -118.84^\circ$	$I_{c1} = 2.92 \text{ A}$	$\beta_{c1} = -236.29^\circ$	$I_{n1} = 1.82 \text{ A}$	$\beta_{n1} = 0.34^\circ$
$I_1^+ = 3.55 \text{ A}$	$\beta_1^+ = 1.96^\circ$	$I_1^- = 0.68 \text{ A}$	$\beta_1^- = -0.74^\circ$	$I_1^0 = 0.61 \text{ A}$	$\beta_1^0 = 0.34^\circ$		
$I_{aH} = 0.08 \text{ A}$		$I_{bH} = 0.21 \text{ A}$		$I_{cH} = 0.03 \text{ A}$		$I_{nH} = 0.28 \text{ A}$	
$I_{e\#} = 3.67 \text{ A}$		$I_{e1\#} = 3.67 \text{ A}$		$I_{eH\#} = 0.13 \text{ A}$			
$THD_{Ia}^* = 1.65 \%$		$THD_{Ib}^* = 4.34 \%$		$THD_{Ic}^* = 0.62 \%$		$THD_{In}^* = 2.69 \%$	

Tabla 7-17. Corrientes y THD_I 's de la red tras la compensación de Q_1^+ y $S_{eN\#}$.

La tabla 7-18 presenta las potencias y los diferentes factores de análisis calculados a partir de las tensiones en el pcc y las corrientes de la red eléctrica durante la compensación.

$S_{e\#} = 1401.99 \text{ VA}$					
$S_{e1\#} = 1399.25 \text{ VA}$			$S_{eN\#} = 87.67 \text{ VA}$		
$S_1^+ = 1354.15 \text{ VA}$		$S_{U1\#} = 352.41 \text{ VA}$	$D_{e1\#} = 83.12 \text{ VA}$	$S_{eH\#} = 1.87 \text{ VA}$	$D_{eV\#} = 27.83 \text{ VA}$
$P_1^+ = 1353.54 \text{ W}$	$Q_1^+ = 46.99 \text{ var}$				
$S_{UV\#} = 17.74 \text{ VA}$	$S_{UH\#} = 351.94 \text{ VA}$	$S_{U1U\#} = 4.57 \text{ VA}$	$P_H = 0 \text{ W}$		$D_{eH\#} = 1.87 \text{ VA}$
$P = 1348.83 \text{ W}$	$P_1 = 1350.36 \text{ W}$		$P_H = 0 \text{ W}$		
$P_a = 605.84 \text{ W}$	$P_b = 366.49 \text{ W}$		$P_c = 376.5 \text{ W}$		
$P_{a1} = 606.37 \text{ W}$	$P_{b1} = 366.99 \text{ W}$		$P_{c1} = 377.03 \text{ W}$		
$P_1^+ = 1353.54 \text{ W}$	$P_1^- = -0.92 \text{ W}$		$P_1^0 = -2.25 \text{ W}$		
$Q = 47.01 \text{ var}$	$Q_1 = 47.01 \text{ var}$		$Q_H = 0.05 \text{ var}$		
$P_{Fm} = 0.85$	$Q_1^- = 1.39 \text{ var}$		$Q_1^0 = 1.36 \text{ var}$		
$P_{F\#} = 0.97$	$P_{F1\#} = 0.97$		$P_{F1^+} = 1$		
$P_{FT\#} = 0.97$	$I_e = 3.82 \text{ A}$				

Tabla 7-18. Potencias y factores de mérito en la red de suministro (compensación de Q_1^+ y $S_{eN\#}$).

El SAPC genera las corrientes de compensación para reducir las corrientes de desfase y de distorsión ($I_{z1_SAPC}^{+r}$ e I_{zH_SAPC}) demandadas por la carga, la red eléctrica se libera de tener que entregar estas corrientes. Cuando se compensa $S_{eN\#}$, el SAPC reduce las corrientes no fundamentales del neutro, mientras que la compensación de Q_1^+ no contribuye con la reducción de las corrientes del neutro. Por estas razones, la corriente del neutro en la red contiene en gran parte componentes fundamentales. Tras la compensación, las potencias Q_1^+ , y $S_{eN\#}$ entregadas por la red de suministro se reducen a 46.99 var y 87.67 VA. Las potencias $D_{eH\#}$ y $S_{eH\#}$ se reducen a 83.12 VA y 1.87 VA. $D_{eH\#}$ y $S_{eH\#}$ son parte de $S_{eN\#}$ y se reducen debido a que dependen de corrientes no fundamentales, mientras que la potencia $D_{eV\#}$, que depende de V_{eH} , permanece prácticamente igual antes y durante la compensación. La potencia $S_{U1\#}$ permanece prácticamente inalterada durante la compensación. Se presenta un leve incremento de P_1^+ , esto se debe a que el SAPC requiere potencia activa para mantener cargado el bus de continua y para satisfacer las pérdidas internas de los IGBT's ($\Delta P_1^+=290.48$ W). Los THD_I 's se reducen considerablemente indicando que no existen componentes importantes de corriente no fundamental en la red. Con la compensación de Q_1^+ y $S_{eN\#}$, las potencias $S_{e\#}$ y $S_{e1\#}$ se reducen, por lo que $P_{F\#}$ y $P_{F1\#}$ aumentan. También se cumple que $P_1^+=S_1^+$ y por eso P_{F1}^+ es 1. El factor de potencia total $P_{FT\#}$ aumenta pero llega a ser 1 debido a que $S_{e\#}$, tras la compensación, aún incluye a $S_{U1\#}$.

7.3.1.7. Compensación conjunta de Q_1^+ , $S_{U1\#}$, y $S_{eN\#}$. Estrategia de compensación G_T .

En esta sección se muestran los resultados experimentales obtenidos tras la conexión del SAPC cuando se decide compensar todas las potencias ineficientes demandadas por la carga (Q_1^+ , $S_{U1\#}$, y $S_{eN\#}$). De acuerdo a esto, el SAPC asigna $K_Q=1$, $K_U=1$, $K_H=1$ a los coeficientes de escalado de las corrientes de compensación de la ecuación (7.1). Los resultados experimentales obtenidos mediante la compensación de Q_1^+ , $S_{U1\#}$, y $S_{eN\#}$ coinciden con los resultados de simulación de la sección 6.2.1.7. Las corrientes de compensación que inyecta el SAPC a la carga se muestran en la figura 7-20. Las corrientes que suministra la red eléctrica durante la conexión del SAPC se muestran en la figura 7-21.

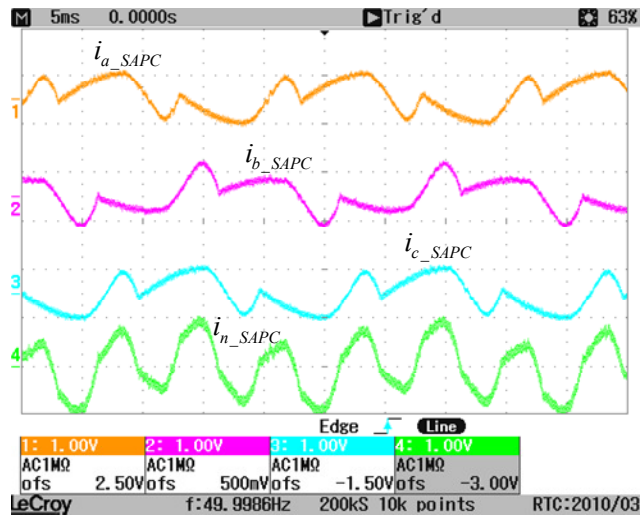


Figura 7-20. Corrientes de salida del SAPC y corriente del neutro cuando se compensa Q_1^+ , $S_{U1\#}$, y $S_{eN\#}$.

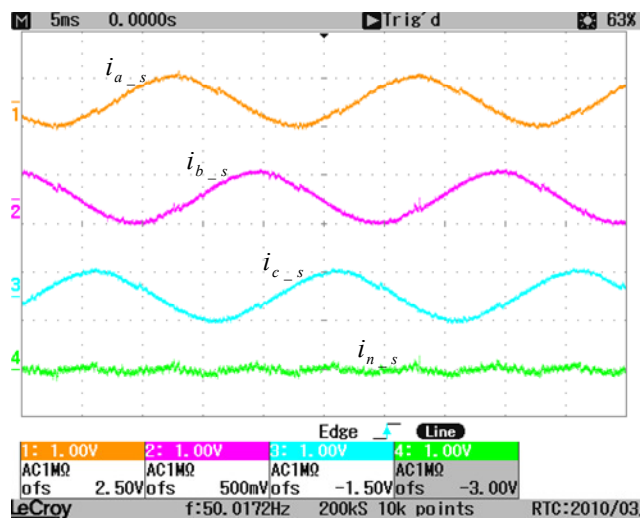


Figura 7-21. Corrientes de red durante la compensación de Q_1^+ , $S_{U1\#}$, y $S_{eN\#}$.

Las corrientes que suministra la red eléctrica calculadas con las expresiones propuestas en la tesis se muestran en la tabla 7-19.

$I_a = 3.44 \text{ A}$		$I_b = 3.46 \text{ A}$		$I_c = 3.44 \text{ A}$		$I_n = 0.41 \text{ A}$	
$I_{a1} = 3.44 \text{ A}$	$\beta_{a1} = 3.8^\circ$	$I_{b1} = 3.46 \text{ A}$	$\beta_{b1} = -118.42^\circ$	$I_{c1} = 3.44 \text{ A}$	$\beta_{c1} = -236.05^\circ$	$I_{n1} = 0.14 \text{ A}$	$\beta_{n1} = -197.17^\circ$
$I_1^+ = 3.45 \text{ A}$	$\beta_1^+ = 3.11^\circ$	$I_1^- = 0.05 \text{ A}$	$\beta_1^- = 36.14^\circ$	$I_1^0 = 0.05 \text{ A}$	$\beta_1^0 = 162.83^\circ$		
$I_{aH} = 0.08 \text{ A}$		$I_{bH} = 0.12 \text{ A}$		$I_{cH} = 0.04 \text{ A}$		$I_{nH} = 0.38 \text{ A}$	
$I_{eH} = 3.45 \text{ A}$			$I_{e1H} = 3.45 \text{ A}$			$I_{eH\#} = 0.09 \text{ A}$	
$THD_{Ia^*} = 2.32 \%$		$THD_{Ib^*} = 3.49 \%$		$THD_{Ic^*} = 1.16 \%$		$THD_{e1^*} = 2.61 \%$	

Tabla 7-19. Corrientes y THD_i 's de la red tras la compensación de Q_1^+ , $S_{U1\#}$, y $S_{eN\#}$.

La tabla 7-20 presenta las magnitudes de potencia y los diferentes factores de análisis calculados a partir de los valores de las tensiones en el pcc y las corrientes suministradas por la red eléctrica durante la compensación.

$S_{e\#} = 1317.69 \text{ VA}$					
$S_{e1\#} = 1316 \text{ VA}$			$S_{eN\#} = 86.68 \text{ VA}$		
$S_1^+ = 1316 \text{ VA}$		$S_{U1\#} = 32.01 \text{ VA}$	$D_{eH\#} = 81.81 \text{ VA}$	$S_{eH\#} = 1.88 \text{ VA}$	$D_{eV\#} = 26.69 \text{ VA}$
$P_1^+ = 1314.06 \text{ W}$	$Q_1^+ = 71.4 \text{ var}$				
$S_{U1V\#} = 17.24 \text{ VA}$	$S_{U1H\#} = 26.98 \text{ VA}$	$S_{U1U1\#} = 0.35 \text{ VA}$	$P_H = 0 \text{ W}$		$D_{eH\#} = 1.88 \text{ VA}$
$P = 1311.91 \text{ W}$	$P_1 = 1313.06 \text{ W}$		$P_H = 0 \text{ W}$		
$P_a = 430.76 \text{ W}$	$P_b = 437.78 \text{ W}$		$P_c = 443.78 \text{ W}$		
$P_{a1} = 431.06 \text{ W}$	$P_{b1} = 438.26 \text{ W}$		$P_{c1} = 333.68 \text{ W}$		
$P_1^+ = 1312.97 \text{ W}$	$P_1^- = -0.11 \text{ W}$		$P_1^0 = 0.19 \text{ W}$		
$Q = 71.21 \text{ var}$	$Q_1 = 71.16 \text{ var}$		$Q_H = 0.05 \text{ var}$		
$P_{Fm} = 1$	$Q_1^- = 0.08 \text{ var}$		$Q_1^0 = 0.04 \text{ var}$		
$P_{F\#} = 1$	$P_{F1\#} = 1$		$P_{F1^+} = 1$		
$P_{FT\#} = 1$			$I_e = 3.46 \text{ A}$		

Tabla 7-20. Potencias y factores de mérito en la red de suministro (compensación de Q_1^+ , $S_{U1\#}$, y $S_{eN\#}$).

El SAPC genera las corrientes de compensación para reducir las corrientes de desfase, de desequilibrio y de distorsión ($I_{z1_SAPC}^{++}$, I_{zU1_SAPC} , e I_{zH_SAPC}) demandadas por la carga, la red eléctrica se libera de tener que entregar estas corrientes. Cuando se compensa $S_{U1\#}$, el SAPC reduce las corrientes fundamentales del neutro, mientras que cuando se compensa $S_{eN\#}$, el SAPC reduce las corrientes no fundamentales del neutro, consiguiendo que la corriente de neutro en la red sea prácticamente nula. Tras la compensación, las potencias Q_1^+ , $S_{U1\#}$ y $S_{eN\#}$ entregadas por la red se reducen a 71.4 var, 32.01 VA, y 86.68 VA respectivamente. La potencia $D_{eH\#}$ se reduce a 81.81 VA, la potencia $S_{eH\#}$ se reduce a 1.88 VA. $D_{eH\#}$ y $S_{eH\#}$ son parte de $S_{eN\#}$ y se reducen debido a que dependen de corrientes no fundamentales, mientras que la potencia $D_{eV\#}$ que no depende de corrientes no fundamentales permanece prácticamente igual. Se presenta un leve incremento de P_1^+ , esto se debe a que el SAPC requiere potencia activa para mantener cargado el bus de continua y para satisfacer las pérdidas internas de los IGBT's

($\Delta P_1^+ = 251$ W). La potencia aparente efectiva $S_{e\#}$ se reduce a su valor mínimo y es prácticamente igual a P_1^+ . Gracias a que la red deja de suministrar corriente no fundamental, los THD_I 's se reducen considerablemente indicando que no existen componentes importantes de corriente no fundamental en la red. Con la compensación la única potencia que suministra la red es P_1^+ , por lo que todos los factores de potencia son 1. En la siguiente sección, serán resumidos los resultados que se obtuvieron con el SAPC con limitación de potencia.

7.3.2. SAPC's con limitación de potencia.

En esta sección se validarán los algoritmos propuestos para SAPC's con limitación de potencia con pruebas experimentales. Aunque el SAPC selectivo del laboratorio tiene un límite de 10 A rms, se le ha impuesto un límite de 3 A rms ($4.24 A_{pico}$) a las corrientes de compensación del SAPC, esto debido a que la carga disponible demanda aproximadamente 4 A rms por fase y se requiere una corriente máxima menor en la salida del SAPC que permita validar los algoritmos.

A continuación se validará el algoritmo de escalado para la compensación con las 6 secuencias de compensación selectiva, el algoritmo correspondiente a la compensación global modificada con limitación de potencia G_L , y el algoritmo para la compensación de la corriente de neutro N.

Los coeficientes calculados para la compensación selectiva no son exactamente iguales a los que se obtuvieron mediante simulación debido a las pequeñas diferencias entre la carga real y la simulada, y a las diferencias que se producen en la etapa de medición del SAPC.

7.3.2.1. Compensación de las potencias ineficientes de la carga usando la estrategia de compensación selectiva S1 ($S_{eN\#}, S_{U1\#}, Q_1^+$).

En esta sección se muestran los resultados experimentales obtenidos cuando se decide compensar de forma selectiva las potencias ineficientes de la carga usando la secuencia de compensación S1 ($S_{eN\#}, S_{U1\#}, Q_1^+$). De acuerdo a la secuencia de compensación elegida y a las medidas realizadas se calculan los coeficientes de escalado asignando a $K_H=1$, $K_U=0.55$, y $K_Q=0$, estos coeficientes son muy parecidos a los coeficientes obtenidos mediante simulación ($K_{H_SIM}=1$, $K_{U_SIM}=0.51$, y $K_{Q_SIM}=0$). Los resultados experimentales obtenidos mediante la estrategia de compensación S1 coinciden con los resultados de simulación de la sección 6.2.2.1. Las corrientes de compensación que inyecta el SAPC a la carga se muestran en la figura 7-22. Las corrientes que suministra la red eléctrica durante la conexión del SAPC se muestran en la figura 7-23.

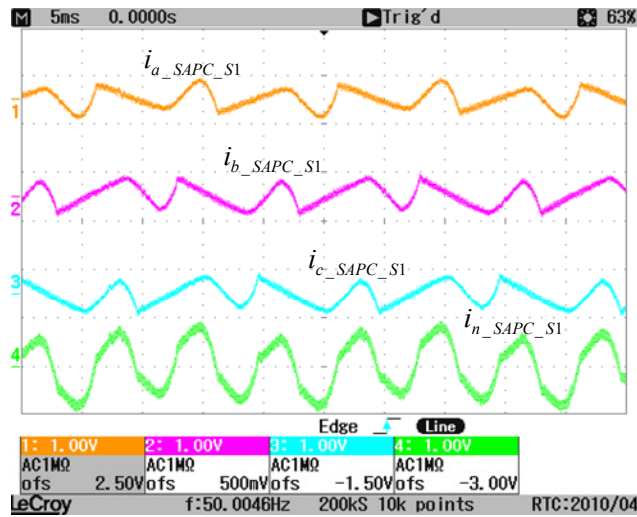


Figura 7-22. Corrientes de salida del SAPC y corriente del neutro usando la estrategia de compensación S1.

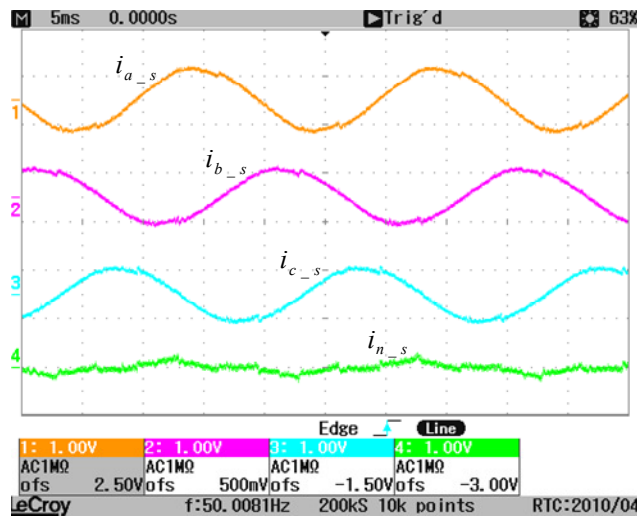


Figura 7-23. Corrientes en la red de suministro durante la compensación con la estrategia S1.

Las corrientes que suministra la red eléctrica calculadas con las expresiones propuestas en la tesis se muestran en la tabla 7-21.

$I_a = 4.56 \text{ A}$		$I_b = 3.91 \text{ A}$		$I_c = 3.88 \text{ A}$		$I_n = 0.71 \text{ A}$	
$I_{a1} = 4.56 \text{ A}$	$\beta_{a1} = -27.84^\circ$	$I_{b1} = 3.91 \text{ A}$	$\beta_{b1} = -153.91^\circ$	$I_{c1} = 3.88 \text{ A}$	$\beta_{c1} = -272.53^\circ$	$I_{n1} = 0.69 \text{ A}$	$\beta_{n1} = 2.45^\circ$
$I_1^+ = 4.11 \text{ A}$	$\beta_1^+ = -31.24^\circ$	$I_1^- = 0.28 \text{ A}$	$\beta_1^- = -0.89^\circ$	$I_1^0 = 0.23 \text{ A}$	$\beta_1^0 = 2.45^\circ$		
$I_{aH} = 0.07 \text{ A}$	$I_{bH} = 0.07 \text{ A}$	$I_{cH} = 0.08 \text{ A}$	$I_{nH} = 0.19 \text{ A}$				
$I_{eH} = 4.13 \text{ A}$		$I_{e1H} = 4.13 \text{ A}$		$I_{eH\#} = 0.07 \text{ A}$			
$THD_{Ia^*} = 1.99 \%$	$THD_{Ib^*} = 1.99 \%$	$THD_{Ic^*} = 2.28 \%$	$THD_{In^*} = 1.99 \%$				

Tabla 7-21. Corrientes y THD's en la red de suministro tras la compensación selectiva S1.

La tabla 7-22 presenta las magnitudes de potencia y los diferentes factores de análisis calculados a partir de los valores de las tensiones en el pcc y las corrientes suministradas por la red eléctrica durante la compensación.

$S_{e\#} = 1576.54 \text{ VA}$					
$S_{e1\#} = 1574.98 \text{ VA}$			$S_{eN\#} = 70.3 \text{ VA}$		
$S_1^+ = 1567.76 \text{ VA}$		$S_{U1\#} = 150.59 \text{ VA}$	$D_{eH\#} = 61.38 \text{ VA}$	$S_{eH\#} = 1.41 \text{ VA}$	$D_{eV\#} = 31.34 \text{ VA}$
$P_1^+ = 1340.44 \text{ W}$	$Q_1^+ = 813.08 \text{ var}$				
$S_{U1V\#} = 20.53 \text{ VA}$	$S_{U1H\#} = 149.17 \text{ VA}$	$S_{U1U\#} = 1.81 \text{ VA}$	$P_H = 0 \text{ W}$		$D_{eH\#} = 1.41 \text{ VA}$
$P = 1339.3 \text{ W}$	$P_1 = 1340.73 \text{ W}$	$P_H = 0 \text{ W}$			
$P_a = 504.98 \text{ W}$	$P_b = 413.01 \text{ W}$	$P_c = 421.3 \text{ W}$			
$P_{a1} = 505.41 \text{ W}$	$P_{b1} = 413.56 \text{ W}$	$P_{c1} = 421.79 \text{ W}$			
$P_1^+ = 1341.94 \text{ W}$	$P_1^- = -0.38 \text{ W}$	$P_1^0 = -0.83 \text{ W}$			
$Q = 814.21 \text{ var}$	$Q_1 = 814.2 \text{ var}$	$Q_H = 0.05 \text{ var}$			
$P_{F\#} = 0.86$	$Q_1^- = 1.36 \text{ var}$	$Q_1^0 = 1.39 \text{ var}$			
$P_{F\#} = 0.85$	$P_{F1\#} = 0.85$	$P_{F1}^+ = 0.86$			
$P_{FT\#} = 0.85$	$UF = 0.67$	$I_e = 4.15 \text{ A}$			

Tabla 7-22. Potencias y factores de mérito en la red de suministro (compensación selectiva S1).

El SAPC genera las corrientes de compensación para reducir las corrientes de desequilibrio y de distorsión (I_{zU1_SAPC} , e I_{zH_SAPC}) demandadas por la carga. La corriente I_{zH_SAPC} es inyectada totalmente a la carga debido a que $K_H=1$. La corriente I_{zU1_SAPC} es inyectada parcialmente a la carga debido a que $K_U=0.55$. La corriente que circula por el neutro se reduce. Las componentes de corriente no fundamental que circulan por el neutro se reducen considerablemente, mientras que las componentes de corriente fundamental que circulan por el neutro sólo se reducen parcialmente. Tras la compensación la corriente efectiva I_e de la red es reducida.

La potencia $S_{eN\#}$ se reduce a 70.3 VA, la potencia $D_{eH\#}$ se reduce a 61.38 VA, la potencia $S_{eH\#}$ se reduce a 1.41 VA. $D_{eH\#}$ y $S_{eH\#}$ son parte de $S_{eN\#}$ y se reducen debido a que dependen de corrientes no fundamentales, mientras que la potencia $D_{eV\#}$ que depende de V_{eH} permanece prácticamente igual. La potencia $S_{U1\#}$, con una $K_U=0.55$, es parcialmente eliminada y se reduce a 150.59 VA. La potencia Q_1^+ no es compensada por lo permanece prácticamente inalterada. Se presenta un leve incremento de P_1^+ , esto se debe a que el SAPC requiere potencia activa para mantener cargado el bus de continua y para satisfacer las pérdidas internas de los IGBT's ($\Delta P_1^+=277.38 \text{ W}$). La reducción de las potencias ineficientes provoca la reducción de $S_{e\#}$.

Gracias a que la red eléctrica deja de suministrar corrientes no fundamentales, los THD_I 's se reducen considerablemente indicando que no existen componentes importantes de corriente no fundamental en la red. El factor de potencia P_{F1}^+ aumenta levemente debido al incremento de P_1^+ y S_1^+ a pesar de que Q_1^+ no es compensada, mientras que el factor de potencia $P_{F\#}$ y el factor de potencia total $P_{FT\#}$ aumentan debido a la disminución de $S_{e\#}$.

7.3.2.2. Compensación de las potencias ineficientes de la carga usando la estrategia de compensación selectiva S2 ($S_{eN\#}$, Q_1^+ , $S_{U1\#}$).

En esta sección se muestran los resultados experimentales obtenidos cuando se decide compensar de forma selectiva las potencias ineficientes de la carga usando la secuencia de compensación S2 ($S_{eN\#}$, Q_1^+ , $S_{U1\#}$). De acuerdo a la secuencia de compensación elegida y a las medidas realizadas se calculan los coeficientes de escalado asignando a $K_H=1$, $K_Q=0.40$, y $K_U=0$, estos coeficientes son muy parecidos a los coeficientes obtenidos mediante simulación ($K_{H_SIM}=1$, $K_{Q_SIM}=0.39$, y $K_{U_SIM}=0$). Los resultados experimentales obtenidos mediante la estrategia de compensación S2 coinciden con los resultados de simulación de la sección 6.2.2.2. Las corrientes de compensación que inyecta el SAPC a la carga se muestran en la figura 7-24. Las corrientes que suministra la red eléctrica durante la conexión del SAPC se muestran en la figura 7-25.

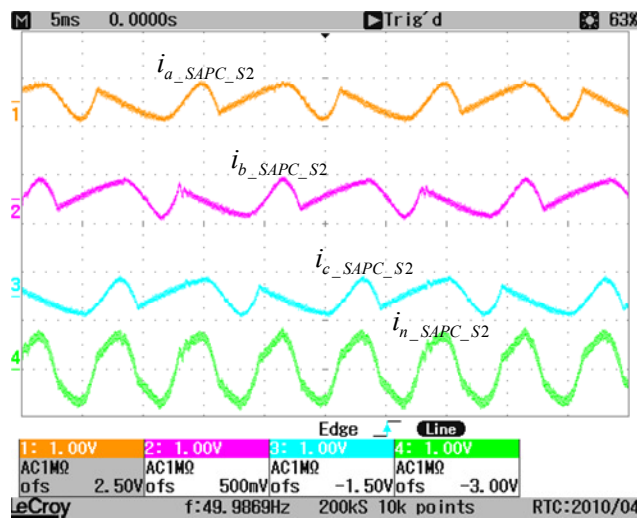


Figura 7-24. Corrientes de salida del SAPC y corriente del neutro usando la estrategia de compensación S2.

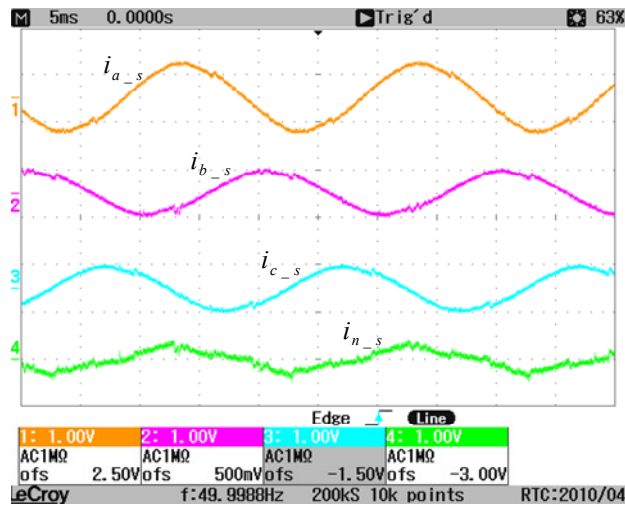


Figura 7-25. Corrientes en la red de suministro durante la compensación con la estrategia S2.

La tabla 7-23 presenta las corrientes que suministra la red eléctrica tras la compensación.

$I_a = 4.93 \text{ A}$		$I_b = 3.14 \text{ A}$		$I_c = 3.13 \text{ A}$		$I_n = 1.77 \text{ A}$	
$I_{a1} = 4.93 \text{ A}$	$\beta_{a1} = -14.97^\circ$	$I_{b1} = 3.14 \text{ A}$	$\beta_{b1} = -142.36^\circ$	$I_{c1} = 3.13 \text{ A}$	$\beta_{c1} = -260.54^\circ$	$I_{n1} = 1.76 \text{ A}$	$\beta_{n1} = -3.31^\circ$
$I_1^+ = 3.73 \text{ A}$	$\beta_1^+ = -18.6^\circ$	$I_1^- = 0.64 \text{ A}$	$\beta_1^- = -4.49^\circ$	$I_1^0 = 0.59 \text{ A}$	$\beta_1^0 = -3.31^\circ$		
$I_{aH} = 0.03 \text{ A}$		$I_{bH} = 0.15 \text{ A}$		$I_{cH} = 0.06 \text{ A}$		$I_{nH} = 0.22 \text{ A}$	
$I_{e\#} = 3.83 \text{ A}$		$I_{e1\#} = 3.83 \text{ A}$		$I_{eH\#} = 0.10 \text{ A}$			
$THD_{Ia}^* = 0.85 \%$		$THD_{Ib}^* = 4.24 \%$		$THD_{Ic}^* = 1.70 \%$		$THD_{In}^* = 2.83 \%$	

Tabla 7-23. Corrientes y THD_I 's de la red tras la compensación selectiva S2.

La tabla 7-24 presenta las potencias calculadas a partir de las tensiones y las corrientes de la red eléctrica durante la compensación.

$S_{e\#} = 1512.41 \text{ VA}$					
$S_{e1\#} = 1510.77 \text{ VA}$			$S_{eN\#} = 70.55 \text{ VA}$		
$S_1^+ = 1422.81 \text{ VA}$		$S_{U1\#} = 507.97 \text{ VA}$	$D_{e1\#} = 64.6 \text{ VA}$	$S_{eH\#} = 1.41 \text{ VA}$	$D_{eV\#} = 28.31 \text{ VA}$
$P_1^+ = 1348.49 \text{ W}$	$Q_1^+ = 453.81 \text{ var}$				
$S_{UV\#} = 18.64 \text{ VA}$	$S_{U1\#} = 507.61 \text{ VA}$	$S_{U1U\#} = 4.35 \text{ VA}$	$P_H = 0 \text{ W}$		$D_{eH\#} = 1.41 \text{ VA}$
$P = 1342.94 \text{ W}$	$P_1 = 1344.52 \text{ W}$		$P_H = -1.61 \text{ W}$		
$P_a = 596.53 \text{ W}$	$P_b = 368.49 \text{ W}$		$P_c = 377.93 \text{ W}$		
$P_{a1} = 597.07 \text{ W}$	$P_{b1} = 369.11 \text{ W}$		$P_{c1} = 378.37 \text{ W}$		
$P_1^+ = 1347.57 \text{ W}$	$P_1^- = -0.79 \text{ W}$		$P_1^0 = -2.27 \text{ W}$		
$Q = 454.25 \text{ var}$	$Q_1 = 454.21 \text{ var}$		$Q_H = 0.04 \text{ var}$		
$P_{Fm} = 0.95$	$Q_1^- = 0.86 \text{ var}$		$Q_1^0 = 0.81 \text{ var}$		
$P_{F\#} = 0.89$	$P_{F1\#} = 0.88$		$P_{F1^+} = 0.95$		
$P_{FT\#} = 0.89$	$UF = 0.75$		$I_e = 3.96 \text{ A}$		

Tabla 7-24. Potencias y factores de mérito en la red de suministro (compensación selectiva S2).

El SAPC genera las corrientes de compensación para reducir las corrientes de desfase, y de distorsión ($I_{z1_SAPC}^{+r}$, e I_{zH_SAPC}) demandadas por la carga. La corriente I_{zH_SAPC} es inyectada totalmente a la carga debido a que $K_H=1$. La corriente $I_{z1_SAPC}^{+r}$ es inyectada parcialmente a la carga debido a que $K_Q=0.40$. La corriente que circula por el neutro se reduce. La corriente no fundamental que circula por el neutro se reduce considerablemente, mientras que la corriente fundamental que circula por el neutro no es compensada y permanece prácticamente inalterada. Tras la compensación, la corriente efectiva I_e de la red es reducida.

La potencia $S_{eN\#}$ se reduce a 32.82 VA, las potencias $D_{eH\#}$ y $S_{eH\#}$ se reducen a 0 VA y 1.41 VA respectivamente. $D_{eH\#}$ y $S_{eH\#}$ son parte de $S_{eN\#}$ y se reducen debido a que dependen de corrientes no fundamentales, mientras que la potencia $D_{eV\#}$ que no depende de corrientes no fundamentales permanece prácticamente igual. La potencia Q_1^+ es parcialmente eliminada y se reduce a 453.81 var. La potencia $S_{U1\#}$ no es compensada por lo permanece prácticamente inalterada. Se presenta un leve incremento de P_1^+ , esto se debe a que el SAPC requiere potencia activa para mantener cargado el bus de continua y para satisfacer las pérdidas internas de los IGBT's ($\Delta P_1^+=285.43$ W). La reducción de las potencias ineficientes provoca la reducción de $S_{e\#}$.

Gracias a que la red deja de suministrar corriente no fundamental, los THD_I 's se reducen notablemente indicando que no existen componentes importantes de corriente no fundamental en la red. El factor de potencia P_{F1}^+ aumenta pero no llega a 1 debido a que Q_1^+ es parcialmente compensada y al incremento de P_1^+ y S_1^+ , mientras que el factor de potencia $P_{F\#}$ y el factor de potencia total $P_{FT\#}$ aumentan debido a la disminución de $S_{e\#}$.

7.3.2.3. Compensación de las potencias ineficientes de la carga usando la estrategia de compensación selectiva S3 ($S_{U1\#}$, $S_{eN\#}$, Q_1^+).

En esta sección se muestran los resultados experimentales obtenidos cuando se decide compensar de forma selectiva las potencias ineficientes de la carga usando la secuencia de compensación S3 ($S_{U1\#}$, $S_{eN\#}$, Q_1^+). De acuerdo a la secuencia de compensación elegida y a las medidas realizadas se calculan los coeficientes de escalado asignando a $K_U=1$, $K_H=0.81$, y $K_Q=0$, estos coeficientes son muy parecidos a los coeficientes obtenidos mediante simulación ($K_{U_SIM}=1$, $K_{H_SIM}=0.78$, y $K_{Q_SIM}=0$). Los resultados experimentales obtenidos mediante la estrategia de compensación S3 coinciden con los resultados de simulación de la sección 6.2.2.3. Las corrientes de compensación que inyecta el SAPC a la carga se muestran en la figura 7-26. Las corrientes que suministra la red eléctrica durante la conexión del SAPC se muestran en la figura 7-27.

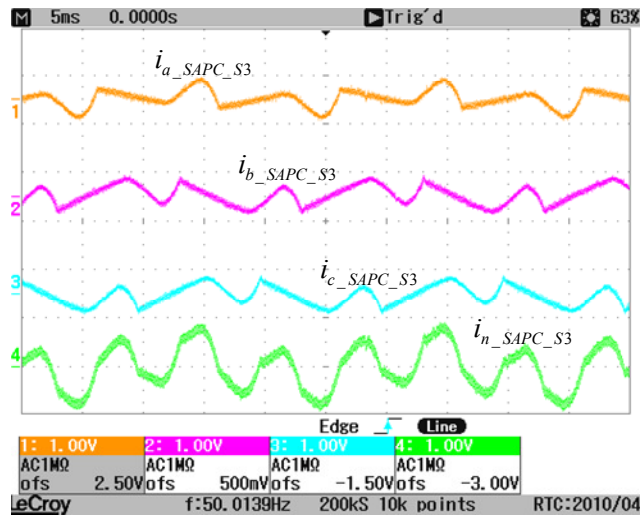


Figura 7-26. Corrientes de salida del SAPC y corriente del neutro usando la estrategia de compensación S3.

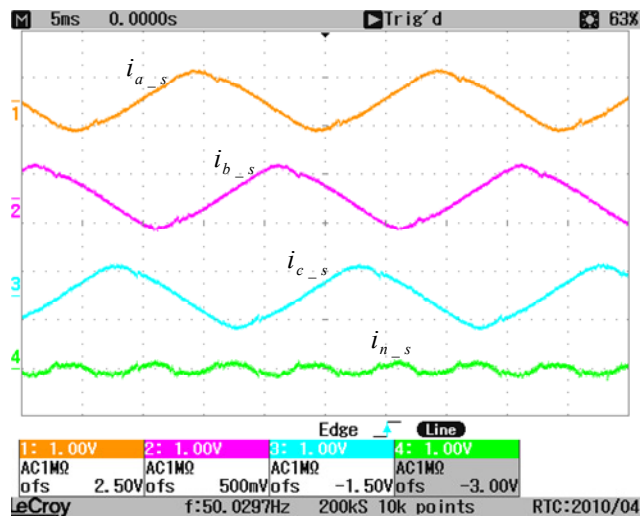


Figura 7-27. Corrientes en la red de suministro durante la compensación con la estrategia S3.

Las corrientes que suministra la red eléctrica calculadas con las expresiones propuestas en la tesis se muestran en la tabla 7-25.

$I_a = 3.99 \text{ A}$		$I_b = 4.09 \text{ A}$		$I_c = 4.12 \text{ A}$		$I_n = 0.8 \text{ A}$	
$I_{a1} = 3.98 \text{ A}$	$\beta_{a1} = -31.18^\circ$	$I_{b1} = 4.08 \text{ A}$	$\beta_{b1} = -152.76^\circ$	$I_{c1} = 4.11 \text{ A}$	$\beta_{c1} = -271.81^\circ$	$I_{n1} = 0.2 \text{ A}$	$\beta_{n1} = -243.48^\circ$
$I_1^+ = 4.06 \text{ A}$	$\beta_1^+ = -31.92^\circ$	$I_1^- = 0.02 \text{ A}$	$\beta_1^- = 106.01^\circ$	$I_1^0 = 0.07 \text{ A}$	$\beta_1^0 = 116.52^\circ$		
$I_{aH} = 0.25 \text{ A}$		$I_{bH} = 0.27 \text{ A}$		$I_{cH} = 0.26 \text{ A}$		$I_{nH} = 0.77 \text{ A}$	
$I_{eH} = 4.07 \text{ A}$		$I_{e1H} = 4.06 \text{ A}$		$I_{eH} = 0.26 \text{ A}$			
$THD_{Ia^*} = 7.25 \%$		$THD_{Ib^*} = 7.83 \%$		$THD_{Ic^*} = 7.54 \%$		$THD_{In^*} = 7.54 \%$	

Tabla 7-25. Corrientes y THD_I 's de la red tras la compensación selectiva S3.

La tabla 7-26 presenta las magnitudes de potencia y los diferentes factores de análisis calculados a partir de los valores de las tensiones en el pcc y las corrientes suministradas por la red eléctrica durante la compensación.

$S_{e\#} = 1551.86 \text{ VA}$					
$S_{e1\#} = 1548.19 \text{ VA}$			$S_{eN\#} = 113.84 \text{ VA}$		
$S_1^+ = 1548.19 \text{ VA}$		$S_{U1\#} = 34.39 \text{ VA}$	$D_{e1\#} = 108.72 \text{ VA}$	$S_{eH\#} = 2.50 \text{ VA}$	$D_{eV\#} = 30.79 \text{ VA}$
$P_1^+ = 1314.51 \text{ W}$	$Q_1^+ = 818.84 \text{ var}$				
$S_{U1V\#} = 20.29 \text{ VA}$	$S_{U1H\#} = 27.76 \text{ VA}$	$S_{U1U\#} = 0.36 \text{ VA}$	$P_H = 0.73 \text{ W}$		$D_{eH\#} = 2.49 \text{ VA}$
$P = 1312.77 \text{ W}$	$P_1 = 1313.46 \text{ W}$		$P_H = 0.73 \text{ W}$		
$P_a = 426.72 \text{ W}$	$P_b = 436.26 \text{ W}$		$P_c = 449.78 \text{ W}$		
$P_{a1} = 427.13 \text{ W}$	$P_{b1} = 436.39 \text{ W}$		$P_{c1} = 449.98 \text{ W}$		
$P_1^+ = 1313.25 \text{ W}$	$P_1^- = -0.04 \text{ W}$		$P_1^0 = 0.25 \text{ W}$		
$Q = 819.02 \text{ var}$	$Q_1 = 818.96 \text{ var}$		$Q_H = 0.07 \text{ var}$		
$P_{Fm} = 0.85$	$Q_1^- = 0.08 \text{ var}$		$Q_1^0 = 0.04 \text{ var}$		
$P_{F\#} = 0.85$	$P_{F1\#} = 0.85$		$P_{F1}^+ = 0.85$		
$P_{FT\#} = 0.85$	$UF = 0.62$		$I_e = 4.09 \text{ A}$		

Tabla 7-26. Potencias y factores de mérito en la red de suministro (compensación selectiva S3).

El SAPC genera las corrientes de compensación para reducir las corrientes de desequilibrio y de distorsión (I_{zU1_SAPC} , e I_{zH_SAPC}) demandadas por la carga. La corriente I_{zU1_SAPC} es inyectada totalmente a la carga debido a que $K_U=1$. La corriente I_{zH_SAPC} es inyectada parcialmente a la carga debido a que $K_H=0.81$. La corriente que circula por el neutro se reduce. La corriente fundamental que circula por el neutro se reduce considerablemente, mientras que la corriente no fundamental que circula por el neutro sólo se reduce parcialmente. Tras la compensación la corriente efectiva I_e de la red es reducida.

La potencia $S_{U1\#}$ se reduce a 34.39 VA, la potencia $S_{eN\#}$ es parcialmente eliminada y se reduce a 113.84 VA, la potencia Q_1^+ no es compensada por lo que permanece prácticamente inalterada. Se presenta un leve incremento de P_1^+ , esto se debe a que el SAPC requiere potencia activa para mantener cargado el bus de continua y para satisfacer las pérdidas internas de los IGBT's ($\Delta P_1^+ = 251.45 \text{ W}$). La reducción de las potencias ineficientes provocan la reducción de $S_{e\#}$.

Gracias a que la red suministra menos corriente no fundamental, los THD_I 's se reducen considerablemente. Los factores de potencia $P_{F1\#}$ y P_{F1}^+ aumentan levemente debido al incremento de P_1^+ y S_1^+ y a pesar de que Q_1^+ no es compensada, el factor de potencia $P_{F\#}$ y el factor de potencia total $P_{FT\#}$ aumentan debido a la disminución de $S_{e\#}$.

7.3.2.4. Compensación de las potencias ineficientes de la carga usando la estrategia de compensación selectiva S4 (Q_1^+ , $S_{eN\#}$, $S_{U1\#}$).

En esta sección se muestran los resultados experimentales obtenidos cuando se decide compensar de forma selectiva las potencias ineficientes de la carga usando la secuencia de compensación S4 (Q_1^+ , $S_{eN\#}$, $S_{U1\#}$). De acuerdo a la secuencia de compensación elegida y a las medidas realizadas se calculan los coeficientes de escalado asignando a $K_Q=1$, $K_H=0.67$, $K_U=0$, estos coeficientes son muy parecidos a los coeficientes obtenidos mediante simulación ($K_{Q_SIM}=1$, $K_{H_SIM}=0.72$, $K_{U_SIM}=0$). Los resultados experimentales obtenidos mediante la estrategia de compensación S4 coinciden con los resultados de simulación de la sección 6.2.2.4. Las corrientes de compensación que inyecta el SAPC a la carga se muestran en la figura 7-28. Las corrientes que suministra la red eléctrica durante la conexión del SAPC se muestran en la figura 7-29.

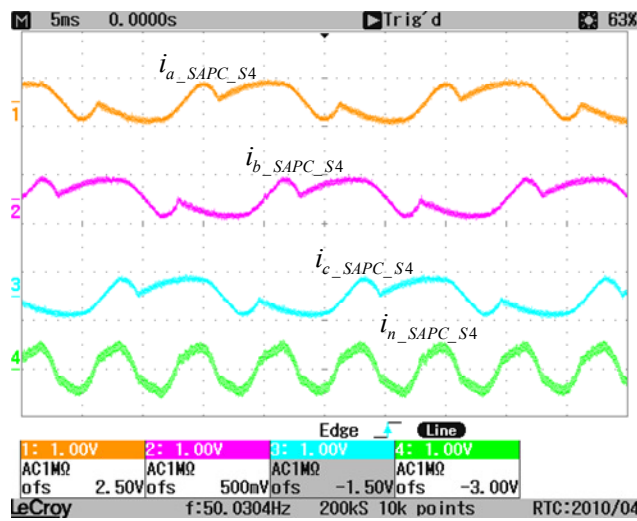


Figura 7-28. Corrientes de salida del SAPC y corriente del neutro usando la estrategia de compensación S4.

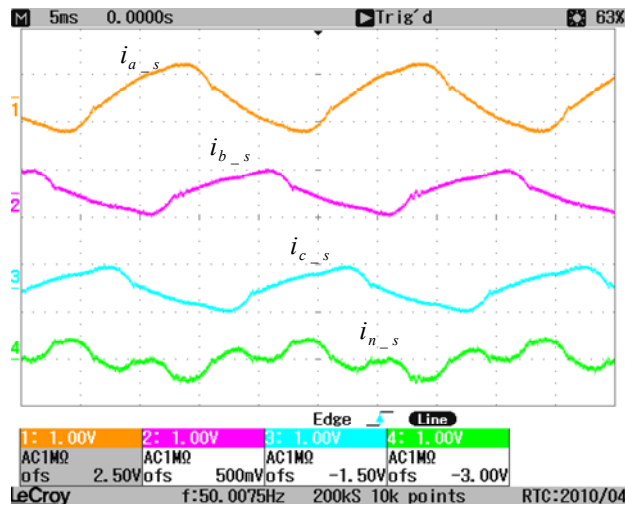


Figura 7-29. Corrientes en la red de suministro durante la compensación con la estrategia S4.

La tabla 7-27 presenta las corrientes que suministra la red eléctrica tras la compensación.

$I_a = 4.72 \text{ A}$		$I_b = 2.92 \text{ A}$		$I_c = 2.87 \text{ A}$		$I_n = 2.24 \text{ A}$	
$I_{a1} = 4.69 \text{ A}$	$\beta_{a1} = 3.69^\circ$	$I_{b1} = 2.87 \text{ A}$	$\beta_{b1} = -117.22^\circ$	$I_{c1} = 2.82 \text{ A}$	$\beta_{c1} = -234.81^\circ$	$I_{n1} = 1.74 \text{ A}$	$\beta_{n1} = 1.72^\circ$
$I_1^+ = 3.46 \text{ A}$	$\beta_1^+ = 3.85^\circ$	$I_1^- = 0.65 \text{ A}$	$\beta_1^- = 4.62^\circ$	$I_1^0 = 0.58 \text{ A}$	$\beta_1^0 = 1.72^\circ$		
$I_{aH} = 0.51 \text{ A}$		$I_{bH} = 0.54 \text{ A}$		$I_{cH} = 0.54 \text{ A}$		$I_{nH} = 1.41 \text{ A}$	
$I_{eH} = 3.61 \text{ A}$		$I_{e1H} = 3.57 \text{ A}$		$I_{eH\#} = 0.53 \text{ A}$			
$THD_{ia^*} = 14.77 \%$		$THD_{ib^*} = 15.64 \%$		$THD_{ic^*} = 15.64 \%$		$THD_{en^*} = 15.35 \%$	

Tabla 7-27. Corrientes y THD_{I^*} 's de la red tras la compensación selectiva S4.

La tabla 7-28 presenta las potencias y los diferentes factores de análisis calculados a partir de las tensiones en el pcc y las corrientes de la red eléctrica durante la compensación.

$S_{e\#} = 1376.50 \text{ VA}$					
$S_{e1\#} = 1361 \text{ VA}$			$S_{en\#} = 205.99 \text{ VA}$		
$S_1^+ = 1319.81 \text{ VA}$		$S_{U1\#} = 332.28 \text{ VA}$	$D_{e1\#} = 203.79 \text{ VA}$	$S_{eH\#} = 4.67 \text{ VA}$	$D_{eV\#} = 27.07 \text{ VA}$
$P_1^+ = 1316.84 \text{ W}$	$Q_1^+ = 88.62 \text{ var}$				
$S_{UV\#} = 17.29 \text{ VA}$	$S_{U1\#} = 331.80 \text{ VA}$	$S_{U1U\#} = 4.35 \text{ VA}$	$P_H = 0.22 \text{ W}$		$D_{eH\#} = 4.67 \text{ VA}$
$P = 1312.38 \text{ W}$	$P_1 = 1312.56 \text{ W}$		$P_H = 0.22 \text{ W}$		
$P_a = 586.44 \text{ W}$	$P_b = 363.21 \text{ W}$		$P_c = 362.73 \text{ W}$		
$P_{a1} = 586.79 \text{ W}$	$P_{b1} = 363.16 \text{ W}$		$P_{c1} = 362.64 \text{ W}$		
$P_1^+ = 1315.7 \text{ W}$	$P_1^- = -1 \text{ W}$		$P_1^0 = -2.13 \text{ W}$		
$Q = 89.23 \text{ var}$	$Q_1 = 88.76 \text{ var}$		$Q_H = 3.04 \text{ var}$		
$P_{Fm} = 1$	$Q_1^- = 0.08 \text{ var}$		$Q_1^0 = 0.04 \text{ var}$		
$P_{F\#} = 0.95$	$P_{F1\#} = 0.97$		$P_{F1^+} = 1$		
$P_{FT\#} = 0.96$	$UF = 0.93$		$I_e = 3.83 \text{ A}$		

Tabla 7-28. Potencias y factores de mérito en la red de suministro (compensación selectiva S4).

El SAPC genera las corrientes de compensación para reducir las corrientes de desfase, y de distorsión ($I_{z1_SAPC}^{+r}$, e I_{zH_SAPC}) demandadas por la carga. La corriente $I_{z1_SAPC}^{+r}$ es inyectada totalmente a la carga debido a que $K_Q=1$. La corriente I_{zH_SAPC} es inyectada parcialmente a la carga debido a que $K_H=0.67$. La corriente no fundamental que circula por el neutro se compensa parcialmente, mientras que la corriente fundamental que circula por el neutro no es compensada. Tras la compensación la corriente efectiva I_e de la red es reducida.

La potencia Q_1^+ se reduce a 88.62 var, la potencia $S_{eN\#}$ es parcialmente eliminada y se reduce a 205.99 VA, la potencia $S_{U1\#}$ no es compensada por lo que permanece prácticamente inalterada. Se presenta un leve incremento de P_1^+ , esto se debe a que el SAPC requiere potencia activa para mantener cargado el bus de continua y para satisfacer las pérdidas internas de los IGBT's ($\Delta P_1^+=256.75$ W). La reducción de las potencias ineficientes provocan la reducción de $S_{e\#}$.

Gracias a que la red eléctrica suministra menos corriente no fundamental, los THD_I 's se reducen considerablemente. Los factores de potencia $P_{F1\#}$ y P_{F1}^+ aumentan a 1 debido a que Q_1^+ es compensada. El factor de potencia $P_{F\#}$ y el factor de potencia total $P_{FT\#}$ aumentan debido a la disminución de $S_{e\#}$.

7.3.2.5. Compensación de las potencias ineficientes de la carga usando las estrategias de compensación selectiva S5 ($S_{U1\#}$, Q_1^+ , $S_{eN\#}$) y S6 (Q_1^+ , $S_{U1\#}$, $S_{eN\#}$).

En esta sección se muestran los resultados experimentales obtenidos cuando se decide compensar de forma selectiva las potencias ineficientes de la carga. En este caso las secuencias de compensación S5 ($S_{U1\#}$, Q_1^+ , $S_{eN\#}$) y S6 (Q_1^+ , $S_{U1\#}$, $S_{eN\#}$) presentan los mismos resultados. De acuerdo a la secuencia de compensación elegida y a las medidas realizadas se calculan los coeficientes de escalado asignando a $K_Q=1$, $K_U=1$, $K_H=0.29$, estos coeficientes son muy parecidos a los coeficientes obtenidos mediante simulación ($K_{Q_SIM}=1$, $K_{U_SIM}=1$, $K_{H_SIM}=0.26$). Los resultados experimentales obtenidos mediante las estrategias de compensación S5 y S6 coinciden con los resultados de simulación de la sección 6.2.2.5. Las corrientes de compensación que inyecta el SAPC a la carga se muestran en la figura 7-30. Las corrientes que suministra la red eléctrica durante la conexión del SAPC se muestran en la figura 7-31.

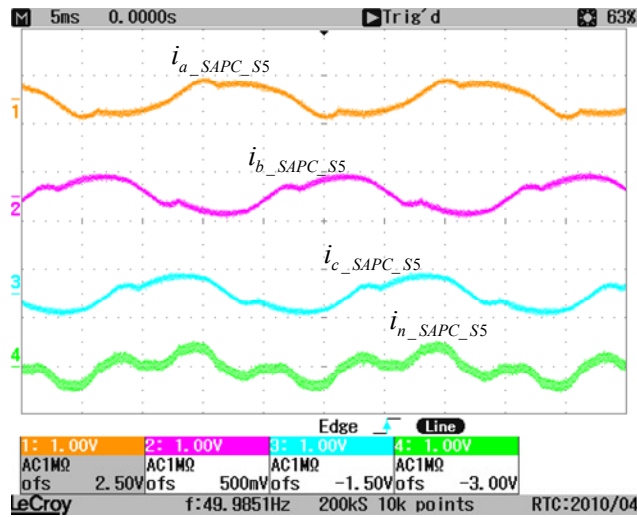


Figura 7-30. Corrientes de salida del SAPC y corriente del neutro usando la estrategia de compensación S5 y S6.

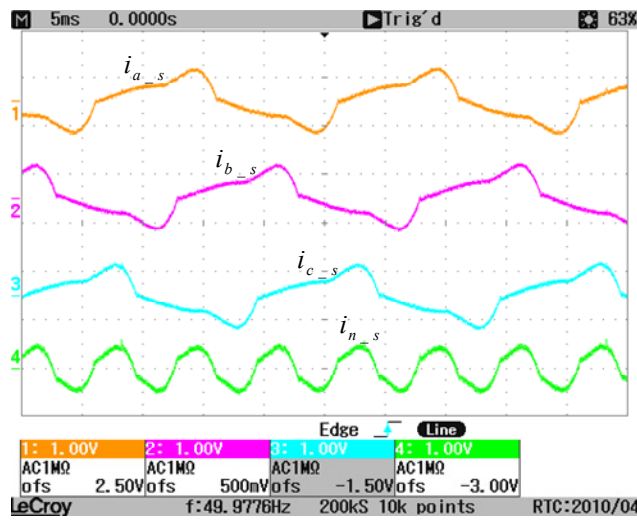


Figura 7-31. Corrientes de red durante la compensación con las estrategias S5 y S6.

Las corrientes que suministra la red eléctrica calculadas con las expresiones propuestas en la tesis se muestran en la tabla 7-29.

$I_a = 3.67 \text{ A}$		$I_b = 3.62 \text{ A}$		$I_c = 3.58 \text{ A}$		$I_n = 3.24 \text{ A}$	
$I_{a1} = 3.47 \text{ A}$	$\beta_{a1} = 3.48^\circ$	$I_{b1} = 3.42 \text{ A}$	$\beta_{b1} = -119.02^\circ$	$I_{c1} = 3.37 \text{ A}$	$\beta_{c1} = -237.32^\circ$	$I_{n1} = 0.05 \text{ A}$	$\beta_{n1} = -249.21^\circ$
$I_1^+ = 3.42 \text{ A}$	$\beta_1^+ = 2.38^\circ$	$I_1^- = 0.07 \text{ A}$	$\beta_1^- = 45.45^\circ$	$I_1^0 = 0.02 \text{ A}$	$\beta_1^0 = 110.79^\circ$		
$I_{aH} = 1.20 \text{ A}$		$I_{bH} = 1.18 \text{ A}$		$I_{cH} = 1.22 \text{ A}$		$I_{nH} = 3.24 \text{ A}$	
$I_{eH} = 3.62 \text{ A}$			$I_{e1H} = 3.42 \text{ A}$			$I_{eH\#} = 1.20 \text{ A}$	
$THD_{Ia^*} = 35.11 \%$		$THD_{Ib^*} = 34.53 \%$		$THD_{Ic^*} = 35.70 \%$		$THD_{In^*} = 35.11 \%$	

Tabla 7-29. Corrientes y THD's en la red de suministro tras la compensación selectiva S5 y S6.

La tabla 7-30 presenta las magnitudes de potencia y los diferentes factores de análisis calculados a partir de los valores de las tensiones en el pcc y las corrientes suministradas por la red eléctrica durante la compensación.

$S_{e\#} = 1382.62 \text{ VA}$					
$S_{e1\#} = 1304.75 \text{ VA}$			$S_{eN\#} = 457.46 \text{ VA}$		
$S_1^+ = 1304.56 \text{ VA}$		$S_{U1\#} = 22.4 \text{ VA}$	$D_{el\#} = 456.44 \text{ VA}$	$S_{eH\#} = 10.46 \text{ VA}$	$D_{el' \#} = 25.96 \text{ VA}$
$P_1^+ = 1303.43 \text{ W}$	$Q_1^+ = 54.17 \text{ var}$				
$S_{U1V\#} = 17.09 \text{ VA}$	$S_{U1H\#} = 14.47 \text{ VA}$	$S_{U1U\#} = 0.36 \text{ VA}$	$P_H = 1.33 \text{ W}$		$D_{eH\#} = 10.38 \text{ VA}$
$P = 1303.93 \text{ W}$	$P_1 = 1302.56 \text{ W}$		$P_H = 1.33 \text{ W}$		
$P_a = 433.73 \text{ W}$	$P_b = 434.83 \text{ W}$		$P_c = 435.37 \text{ W}$		
$P_{a1} = 434.03 \text{ W}$	$P_{b1} = 434 \text{ W}$		$P_{c1} = 434.57 \text{ W}$		
$P_1^+ = 1302.68 \text{ W}$	$P_1^- = 0.18 \text{ W}$		$P_1^0 = 0.06 \text{ W}$		
$Q = 54.89 \text{ var}$	$Q_1 = 54.24 \text{ var}$		$Q_H = 4.53 \text{ var}$		
$P_{Fm} = 1$	$Q_1^- = 0.07 \text{ var}$		$Q_1^0 = 0.04 \text{ var}$		
$P_{F\#} = 0.94$	$P_{F1\#} = 1$		$P_{F1}^+ = 1$		
$P_{FT\#} = 0.94$	$UF = 0.88$		$I_e = 4.08 \text{ A}$		

Tabla 7-30. Potencias y factores de mérito en la red de suministro (compensación selectiva S5 y S6).

El SAPC genera las corrientes de compensación para reducir las corrientes de desfase, de desequilibrio y de distorsión ($I_{z1_SAPC}^{+r}$, I_{zU1_SAPC} , e I_{zH_SAPC}) demandadas por la carga. Las corrientes $I_{z1_SAPC}^{+r}$ e I_{zU1_SAPC} son inyectadas totalmente a la carga debido a que $K_Q=1$ y $K_U=1$. La corriente I_{zH_SAPC} es inyectada parcialmente a la carga debido a que $K_H=0.29$. La corriente fundamental que circula por el neutro es reducida notablemente, mientras que la corriente no fundamental que circula por el neutro es compensada parcialmente. Tras la compensación la corriente efectiva I_e de la red es reducida.

Las potencias Q_1^+ y $S_{U1\#}$ se reducen a 54.17 var y 22.4 VA respectivamente, y la potencia $S_{eN\#}$ es parcialmente eliminada y se reduce a 457.46 VA. Se presenta un leve incremento de P_1^+ , esto se debe a que el SAPC requiere potencia activa para mantener cargado el bus de continua y para satisfacer las pérdidas internas de los IGBT's ($\Delta P_1^+ = 240.37 \text{ W}$). La reducción de las potencias ineficientes provocan la reducción de $S_{e\#}$.

Gracias a que la red eléctrica suministra menos corriente no fundamental, los THD_I 's se reducen, los factores de potencia $P_{F1\#}$ y P_{F1}^+ aumentan a 1 debido a que Q_1^+ es compensada. El factor de potencia $P_{F\#}$ y el factor de potencia total $P_{FT\#}$ aumentan debido a la disminución de $S_{e\#}$.

7.3.2.6. Compensación de las potencias ineficientes de la carga usando la estrategia de compensación global modificada G_L .

En esta sección se muestran los resultados experimentales obtenidos cuando se realiza la compensación global con limitación de potencia o compensación global modificada “ G_L ”. Aplicando el algoritmo propuesto en la sección 4.4.1.3 a las medidas realizadas (ecuación (4.41)), se calcula el coeficiente de escalado $K_G=0.64$, este coeficiente es muy parecido al coeficiente obtenido mediante simulación ($K_{G_SIM}=0.66$). Los resultados experimentales obtenidos mediante la estrategia de compensación G_L coinciden con los resultados de simulación de la sección 6.2.2.6. Las corrientes de compensación que inyecta el SAPC a la carga se muestran en la figura 7-32. Las corrientes que suministra la red durante la conexión del SAPC se muestran en la figura 7-33.

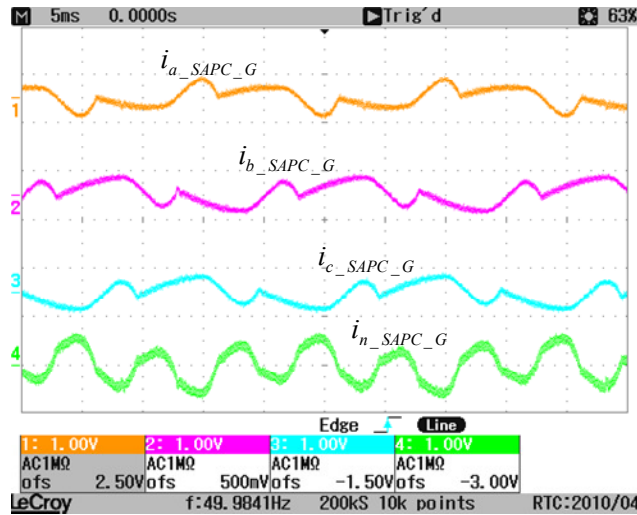


Figura 7-32. Corrientes de salida del SAPC y corriente del neutro usando la estrategia de compensación G_L .

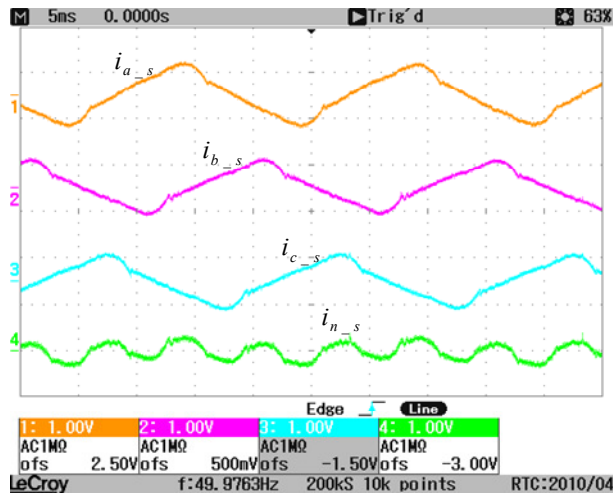


Figura 7-33. Corrientes en la red de suministro durante la compensación con la estrategia G_L .

Las corrientes que suministra la red eléctrica calculadas con las expresiones propuestas en la tesis se muestran en la tabla 7-31.

$I_a = 4.02 \text{ A}$		$I_b = 3.32 \text{ A}$		$I_c = 3.27 \text{ A}$		$I_n = 1.72 \text{ A}$	
$I_{a1} = 3.97 \text{ A}$	$\beta_{a1} = -8.72^\circ$	$I_{b1} = 3.27 \text{ A}$	$\beta_{b1} = -132.1^\circ$	$I_{c1} = 3.22 \text{ A}$	$\beta_{c1} = -250.29^\circ$	$I_{n1} = 0.65 \text{ A}$	$\beta_{n1} = 0.55^\circ$
$I_1^+ = 3.49 \text{ A}$	$\beta_1^+ = -10.26^\circ$	$I_1^- = 0.28 \text{ A}$	$\beta_1^- = 3.37^\circ$	$I_1^0 = 0.22 \text{ A}$	$\beta_1^0 = 0.55^\circ$		
$I_{aH} = 0.59 \text{ A}$		$I_{bH} = 0.6 \text{ A}$		$I_{cH} = 0.58 \text{ A}$		$I_{nH} = 1.6 \text{ A}$	
$I_{eH} = 3.55 \text{ A}$		$I_{e1H} = 3.50 \text{ A}$		$I_{eH\#} = 0.59 \text{ A}$			
$THD_{Ia^*} = 17.18 \%$		$THD_{Ib^*} = 17.47 \%$		$THD_{Ic^*} = 16.89 \%$		$THD_{e1^*} = 17.18 \%$	

Tabla 7-31. Corrientes y THD_I 's de la red tras la compensación G_L .

La tabla 7-32 presenta las potencias calculadas durante la compensación.

$S_{e\#} = 1355.79 \text{ VA}$					
$S_{e1\#} = 1336.48 \text{ VA}$			$S_{eN\#} = 227.97 \text{ VA}$		
$S_1^+ = 1331.26 \text{ VA}$		$S_{U1\#} = 118.09 \text{ VA}$	$D_{e1\#} = 226.04 \text{ VA}$	$S_{eH\#} = 5.18 \text{ VA}$	$D_{e1\#} = 26.59 \text{ VA}$
$P_1^+ = 1309.97 \text{ W}$	$Q_1^+ = 237.12 \text{ var}$				
$S_{U1\#} = 17.44 \text{ VA}$	$S_{U1\#} = 116.78 \text{ VA}$	$S_{U1\#} = 1.78 \text{ VA}$	$P_H = 0.18 \text{ W}$		$D_{eH\#} = 5.17 \text{ VA}$
$P = 1307.25 \text{ W}$	$P_1 = 1307.39 \text{ W}$		$P_H = 0.18 \text{ W}$		
$P_a = 492.42 \text{ W}$	$P_b = 405.54 \text{ W}$		$P_c = 409.29 \text{ W}$		
$P_{a1} = 492.7 \text{ W}$	$P_{b1} = 405.49 \text{ W}$		$P_{c1} = 409.24 \text{ W}$		
$P_1^+ = 1308.62 \text{ W}$	$P_1^- = -0.42 \text{ W}$		$P_1^0 = -0.81 \text{ W}$		
$Q = 237.89 \text{ var}$	$Q_1 = 237.56 \text{ var}$		$Q_H = 1.76 \text{ var}$		
$P_{F\#} = 0.98$	$Q_1^- = 0.54 \text{ var}$		$Q_1^0 = 0.67 \text{ var}$		
$P_{F\#} = 0.96$	$P_{F1\#} = 0.98$		$P_{F1^+} = 0.98$		
$P_{FT\#} = 0.97$	$UF = 0.70$		$I_e = 3.69 \text{ A}$		

Tabla 7-32. Potencias y factores de mérito en la red de suministro (compensación selectiva G_L).

El SAPC genera las corrientes de compensación para reducir parcialmente las corrientes de desfase, de desequilibrio y de distorsión ($I_{z1_SAPC}^{+r}$, I_{zU1_SAPC} , e I_{zH_SAPC}) demandadas por la carga. Las corrientes $I_{z1_SAPC}^{+r}$, I_{zU1_SAPC} , e I_{zH_SAPC} son inyectadas parcialmente a la carga debido a que $K_A=K_B=K_C=0.64$. Las corrientes fundamentales y no fundamentales del neutro son compensadas parcialmente. Tras la compensación, la corriente efectiva I_e de la red es reducida.

Ninguna de las potencias ineficientes de la carga es compensada totalmente. La potencia Q_1^+ se reduce a 237.12 var, la potencia $S_{U1\#}$ se reduce a 118.09 VA, y la potencia $S_{eN\#}$ se reduce a 227.97 VA. Se presenta un leve incremento de P_1^+ , esto se debe a que el SAPC requiere potencia activa para mantener cargado el bus de continua y para satisfacer las pérdidas internas de los IGBT's ($\Delta P_1^+ = 246.91$ W). La reducción de las potencias ineficientes provocan la reducción de $S_{e\#}$.

Gracias a que la red eléctrica suministra menos corriente no fundamental, los THD_I 's se reducen. Debido a que Q_1^+ es compensada parcialmente los factores de potencia $P_{F1\#}$ y P_{F1}^+ aumentan pero no llegan a 1. El factor de potencia $P_{F\#}$ y el factor de potencia total $P_{FT\#}$ aumentan debido a la disminución de $S_{e\#}$.

7.3.2.7. Compensación de las corrientes del neutro. Estrategia de compensación N.

En esta sección se muestran los resultados obtenidos cuando se realiza la compensación de la corriente del neutro "N", según se indica en la sección 4.3.3. De acuerdo a la estrategia de compensación elegida y a las medidas realizadas se calculan los coeficientes de escalado $K_{I_1^0} = 1$ y $K_{I_{nH}} = 1$ (ecuación (4.33)), estos coeficientes de escalado coinciden con los coeficientes obtenidos mediante simulación. Con esta estrategia se compensan las corrientes fundamentales y no fundamentales de secuencia cero siendo eliminadas de las fases a , b , y c y del neutro. Los resultados experimentales obtenidos mediante la estrategia de compensación N coinciden con los resultados de simulación de la sección 6.2.2.7. Las corrientes de compensación que inyecta el SAPC a la carga se muestran en la figura 7-34. Las corrientes que suministra la red durante la conexión del SAPC se muestran en la figura 7-35.

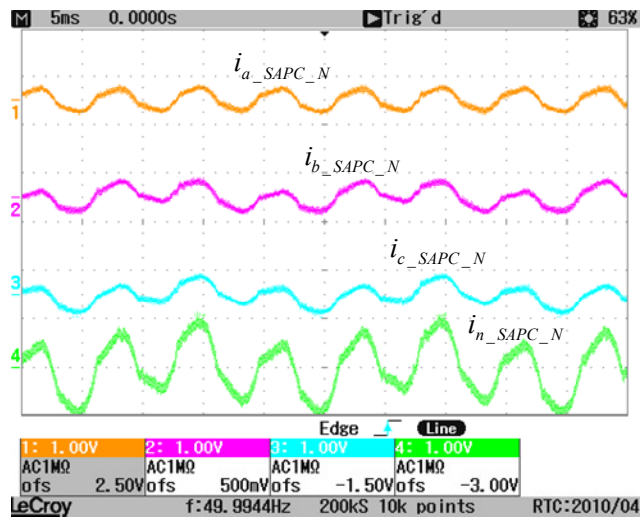


Figura 7-34. Corrientes de salida del SAPC y corriente del neutro usando la estrategia de compensación N.

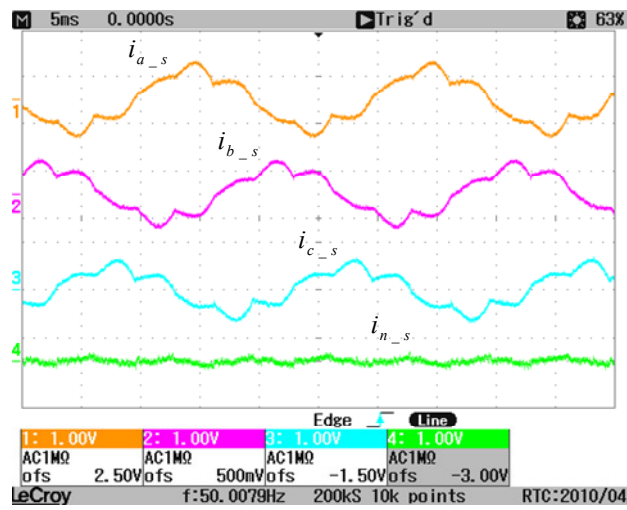


Figura 7-35. Corrientes en la red de suministro durante la compensación con la estrategia N.

La tabla 7-33 presenta las corrientes que suministra la red eléctrica tras la compensación.

$I_a = 4.59 \text{ A}$		$I_b = 4.13 \text{ A}$		$I_c = 3.58 \text{ A}$		$I_n = 0.46 \text{ A}$	
$I_{a1} = 4.52 \text{ A}$	$\beta_{a1} = -28.4^\circ$	$I_{b1} = 4.04 \text{ A}$	$\beta_{b1} = -162.43^\circ$	$I_{c1} = 3.46 \text{ A}$	$\beta_{c1} = -267.41^\circ$	$I_{n1} = 0.1 \text{ A}$	$\beta_{n1} = -249.65^\circ$
$I_1^+ = 3.98 \text{ A}$	$\beta_1^+ = -32.82^\circ$	$I_1^- = 0.64 \text{ A}$	$\beta_1^- = -2.05^\circ$	$I_1^0 = 0.03 \text{ A}$	$\beta_1^0 = 110.35^\circ$		
$I_{aH} = 0.82 \text{ A}$		$I_{bH} = 0.85 \text{ A}$		$I_{cH} = 0.89 \text{ A}$		$I_{nH} = 0.45 \text{ A}$	
$I_{eH} = 4.12 \text{ A}$			$I_{e1H} = 4.03 \text{ A}$			$I_{eH\#} = 0.85 \text{ A}$	
$THD_{Ia^*} = 24.52 \%$		$THD_{Ib^*} = 25.41 \%$		$THD_{Ic^*} = 26.61 \%$		$THD_{In^*} = 25.41 \%$	

Tabla 7-33. Corrientes y THD_I 's en la red de suministro tras la compensación con la estrategia N.

La tabla 7-34 presenta las magnitudes de potencia y los diferentes factores de análisis calculados a partir de las tensiones en el pcc y las corrientes de la red eléctrica durante la compensación.

$S_{e\#} = 1575.48 \text{ VA}$					
$S_{e1\#} = 1537.82 \text{ VA}$			$S_{eN\#} = 342.41 \text{ VA}$		
$S_1^+ = 1517.81 \text{ VA}$		$S_{U1\#} = 247.27 \text{ VA}$	$D_{e1\#} = 340.98 \text{ VA}$	$S_{e1\#} = 6.78 \text{ VA}$	$D_{e1'\#} = 30.58 \text{ VA}$
$P_1^+ = 1276.01 \text{ W}$	$Q_1^+ = 821.92 \text{ var}$				
$S_{U1V\#} = 19.89 \text{ VA}$	$S_{U1H\#} = 116.36 \text{ VA}$	$S_{U1U\#} = 3.20 \text{ VA}$	$P_H = 0.73 \text{ W}$	$D_{eH\#} = 6.74 \text{ VA}$	
$P = 1274.57 \text{ W}$	$P_1 = 1275.28 \text{ W}$		$P_H = 0.73 \text{ W}$		
$P_a = 498.38 \text{ W}$	$P_b = 380.48 \text{ W}$		$P_c = 395.72 \text{ W}$		
$P_{a1} = 498.72 \text{ W}$	$P_{b1} = 380.24 \text{ W}$		$P_{c1} = 396.34 \text{ W}$		
$P_1^+ = 1276.01 \text{ W}$	$P_1^- = 0.84 \text{ W}$		$P_1^0 = -0.11 \text{ W}$		
$Q = 822.56 \text{ var}$	$Q_1 = 822.15 \text{ var}$		$Q_H = 3.76 \text{ var}$		
$P_{Fm} = 0.84$	$Q_1^- = 0.77 \text{ var}$		$Q_1^0 = 0.65 \text{ var}$		
$P_{F\#} = 0.81$	$P_{F1\#} = 0.84$		$P_{F1}^+ = 0.84$		
$P_{FT\#} = 0.81$	$UF = 0.61$		$I_e = 4.97 \text{ A}$		

Tabla 7-34. Potencias y factores de mérito en la red de suministro (compensación N).

El SAPC genera las corrientes de compensación para reducir las corrientes de secuencia cero demandadas por la carga y que circulan por el neutro. La potencia Q_1^+ no es compensada permaneciendo prácticamente inalterada, mientras que $S_{U1\#}$, y $S_{eN\#}$ son parcialmente compensadas reduciendo sus valores a 247.27 VA y 342.41 VA respectivamente. Gracias a que la red eléctrica suministra menos corriente no fundamental, los THD_I 's se reducen. Se presenta un leve incremento de P_1^+ , esto se debe a que el SAPC requiere potencia activa para mantener cargado el bus de continua y para satisfacer las pérdidas internas de los IGBT's ($\Delta P_1^+ = 212.95 \text{ W}$). Para este caso, ΔP_1^+ es menor si se compara con los casos anteriores, esto se debe a que las corrientes que debe inyectar el SAPC para eliminar las corrientes del neutro son menores que las corrientes que debe inyectar el SAPC cuando se utilizan el resto de las estrategias de compensación. En este caso aumenta $S_{e\#}$ debido al aumento de P_1^+ a pesar de que $S_{U1\#}$, y $S_{eN\#}$ son reducidas. Todos los factores de potencia aumentan por la compensación parcial de $S_{U1\#}$, y $S_{eN\#}$.

7.3.2.8. Análisis de los criterios para la compensación con limitación de potencia.

A continuación, en la tabla 7-35, se resumen los resultados experimentales obtenidos en esta sección, comparándose las magnitudes más importantes obtenidas para los diferentes criterios de compensación analizados en la presente tesis:

- Estrategia de compensación global sin limitación de potencia o estrategia de compensación G_T .

- Estrategias de compensación selectiva con limitación de potencia (S1, S2, S3, S4, S5, y S6).
- Estrategia de compensación global modificada o estrategia de compensación con limitación de potencia G_L .
- Estrategia de compensación para eliminar las corrientes de neutro o estrategia de compensación N.

		ESTRATEGIAS DE COMPENSACIÓN								
Potencia	CARGA	G_T	S1	S2	S3	S4	S5	S6	G_L	N
P_1^+ (W)	1063.06	1314.06	1340.44	1348.49	1314.51	1316.84	1303.43	1303.43	1309.97	1276.01
Q_1^+ (var)	832.64	71.4	813.08	453.81	818.84	88.62	54.17	54.17	237.12	821.92
$S_{U1\#}$ (VA)	325.74	32.01	150.59	507.97	34.39	332.28	22.14	22.14	118.09	247.27
$S_{eN\#}$ (VA)	642.02	86.68	70.3	70.55	113.84	205.99	457.46	457.46	227.97	342.41
$S_{e\#}$ (VA)	1530.26	1317.69	1576.54	1512.41	1551.86	1376.50	1382.62	1382.62	1355.79	1575.48
ΔP_1^+ (W)	-----	251	277.38	285.43	251.45	256.75	240.37	240.37	246.91	212.95

Tabla 7-35. Potencias suministradas por la red eléctrica antes y durante la compensación usando las diferentes estrategias de compensación.

Antes de la compensación, la carga demanda de la red eléctrica las potencias P_1^+ , Q_1^+ , $S_{U1\#}$, y $S_{eN\#}$. Durante el uso del SAPC, la potencia P_1^+ aumenta para todas las estrategias de compensación debido a que el SAPC requiere potencia activa para mantener cargado el bus de continua y para satisfacer sus pérdidas internas, este incremento de potencia (ΔP_1^+) es prácticamente constante para todas las estrategias de compensación y varía desde 212.95 W para la estrategia de compensación N hasta 285.43 W para la estrategia de compensación S2.

Las potencias Q_1^+ , $S_{U1\#}$, y $S_{eN\#}$ se reducen en diferentes proporciones de acuerdo a la estrategia de compensación utilizada. La estrategia de compensación G_T reduce todas las potencias ineficientes de la carga, aunque no se eliminan totalmente debido a la imprecisión inherente de la medida y el cálculo, $S_{U1\#}$ y $S_{eN\#}$ tampoco pueden ser eliminadas totalmente debido a la leve asimetría y distorsión de la tensión de alimentación.

Las estrategias de compensación selectiva reducen las potencias ineficientes de acuerdo a la secuencia de compensación elegida. La estrategia de compensación G_L reduce parcialmente todas las potencias ineficientes. La estrategia de compensación N reduce parcialmente las potencias ineficientes asociadas con las corrientes de secuencia cero ($S_{U1\#}$, y $S_{eN\#}$) pero con esta estrategia Q_1^+ no es compensada.

Si no se supera el límite de potencia del SAPC, con la estrategia de compensación G_T la red suministra a la carga P_1^+ y valores reducidos cercanos a cero de Q_1^+ , $S_{U1\#}$, y $S_{eN\#}$. Cuando se supera el límite de potencia del SAPC, la estrategia de compensación que provoca mayor

disminución de la potencia aparente efectiva suministrada por la red es la estrategia de compensación G_L , mientras que las estrategias que provocan menor disminución de la potencia aparente efectiva suministrada por la red son las estrategias de compensación S1 y N.

En la tabla 7-36 se resumen los factores de mérito y los principales términos de corrientes en la red eléctrica, magnitudes útiles para evaluar los criterios de compensación analizados.

		ESTRATEGIAS DE COMPENSACIÓN								
Indicador	CARGA	G_T	S1	S2	S3	S4	S5	S6	G_L	N
P_{Fm}	0.79	1	0.86	0.95	0.85	1	1	1	0.98	0.84
$P_{FT\#}$	0.69	1	0.85	0.89	0.85	0.96	0.94	0.94	0.97	0.81
UF	-----	-----	0.67	0.75	0.62	0.93	0.88	0.88	0.70	0.61
I_e (A)	4.87	3.46	4.15	3.96	4.09	3.83	4.08	4.08	3.69	4.97
I_a (A)	4.83	3.44	4.56	4.93	3.99	4.72	3.67	3.67	4.02	4.59
I_b (A)	3.54	3.46	3.91	3.14	4.09	2.92	3.62	3.62	3.32	4.13
I_c (A)	3.52	3.44	3.88	3.13	4.12	2.87	3.58	3.58	3.27	3.58
I_n (A)	4.8	0.41	0.71	1.77	0.8	2.24	3.24	3.24	1.72	0.46

Tabla 7-36. Factores de mérito en la red de suministro para evaluar criterios de compensación.

Tras analizar experimentalmente los criterios para las estrategias de compensación con limitación de potencia, los resultados son similares a los obtenidos mediante simulación, pudiéndose establecer el mismo orden en el uso de los criterios de compensación. A pesar de que las conclusiones son equivalentes, existen diferencias en algunas magnitudes si se comparan las tablas 6-36 (resultados de simulación) y 7-36 (resultados experimentales).

Una magnitud que se modifica entre el caso simulado y experimental es la potencia útil transferida desde la red de suministro eléctrico al conjunto carga más SAPC. El incremento en la demanda P_1^+ se debe principalmente a que el SAPC requiere una potencia extra, ΔP_1^+ , para funcionar con cualquier estrategia de compensación, compensando las pérdidas internas en el propio inductor VSI. El aumento del valor de P_1^+ afecta a los valores de algunos factores de mérito (P_{Fm} y $P_{FT\#}$ entre otros), mejorando los resultados obtenidos al funcionar el SAPC. Si el aumento del numerador de las expresiones de dichos factores de potencia se acompaña con una reducción de las potencias ineficientes, los factores de potencia mejoran con la conexión del SAPC en cualquiera de sus modos de trabajo.

La carga utilizada demanda 832.64 var de Q_1^+ y presenta un factor de potencia P_{Fm} de 0.79. Tras la compensación, P_{Fm} mejora para todas las estrategias de compensación. Para las estrategias G_T , S4, S5, S6, y G_L , el factor de potencia del sistema es unitario o muy cercano a la unidad, sin penalizaciones por consumo de reactiva por parte de la compañía eléctrica. El resto de estrategias de compensación presentan valores entre 0.95 (estrategia S2) a 0.84, por lo que el consumo no eficiente estaría penalizado por su elevada demanda de potencia reactiva.

La carga demanda del sistema eléctrico la potencia eficiente P_1^+ y las potencias ineficientes Q_1^+ , $S_{U1\#}$, y $S_{eN\#}$, con un factor de potencia $P_{FT\#}$ de 0.69 que es elevado tras la compensación de las potencias ineficientes que demanda la carga, mejorando la calidad de la potencia en los sistemas eléctricos. Los valores de simulación y experimentales de $P_{FT\#}$ presenta resultados similares, con una ligera mejora en los resultados experimentales al efecto combinado de elevarse la demanda de P_1^+ y disminuir las potencias ineficientes demandas a la red eléctrica.

Respecto al factor de uso (UF), la estrategia de compensación selectiva que mejor resultado proporciona es la S4, coincidiendo con los resultados obtenidos mediante simulación. El factor de uso UF es mayor en los resultados experimentales debido a la demanda de ΔP_1^+ por el SAPC cuando suministra las potencias ineficientes que demanda la carga.

Tanto para los resultados de simulación como para los resultados experimentales se presenta una reducción similar de la corriente efectiva (I_e) y de las corrientes rms de los conductores de alimentación (I_a , I_b , I_c , y I_n). Sin embargo, la reducción es menor para las corrientes de los resultados experimentales debido a la demanda de corriente del SAPC para funcionar como compensador de potencias ineficientes.

7.4. Conclusiones.

En el presente capítulo se han presentado los resultados experimentales obtenidos a partir de la implementación de un prototipo basado en el SAPC selectivo. Con el SAPC se validaron todas las corrientes de compensación de forma individual y de forma combinada, verificándose todas las estrategias de compensación propuestas.

En términos generales los resultados experimentales coinciden con los resultados de simulación. En los resultados experimentales existen unas pequeñas discrepancias, debidas principalmente a que el prototipo del SAPC demanda ΔP_1^+ para mantener cargado el bus de continua y para satisfacer sus pérdidas internas. Los factores de potencia de la red experimentales son mejores que los factores de potencia obtenidos mediante simulación debido a la disminución de potencia ineficiente en la red de distribución y la demanda de ΔP_1^+ en el SAPC.

Todos los resultados corroboran el buen funcionamiento del prototipo experimental y demuestran la validez de los modelos utilizados en la simulación, lo que permite extender la validación a la simulación de otras condiciones de red que no pueden obtenerse en el laboratorio. En todos los casos analizados puede observarse una reducción de $I_{e\#}$ y $S_{e\#}$, y una mejora de los principales indicadores de la calidad de la potencia de los sistemas eléctricos de distribución (*THD's*, *P_f's*, etc).

Los resultados experimentales obtenidos demuestran que un SAPC es adecuado para los usuarios finales y para las empresas de distribución, pudiendo desempeñar las siguientes funciones:

- Evitar que las potencias ineficientes que no contribuyen con una transferencia neta y útil de energía sean suministradas por la red. El SAPC selectivo puede suministrar cada potencia ineficiente por separado o cualquier combinación de ellas, mejorando la calidad de la potencia.
- En caso de ocurrencia de un hueco de tensión, el SAPC puede inyectar Q_1^+ y contribuir con la estabilidad de los sistemas eléctricos reduciendo el impacto económico y los problemas operativos asociados a este fenómeno.
- Minimizar el costo de la factura eléctrica debido a la demanda de potencia reactiva y las penalizaciones asociadas a estos consumos de potencia ineficiente.
- Minimizar las pérdidas de potencia en el sistema eléctrico de distribución mejorando la eficiencia global del sistema eléctrico.
- Evitar que se alcance el límite térmico de los conductores de alimentación y reducir la corriente del neutro.

8. Aportaciones y conclusiones, líneas de trabajo futuro, y publicación de resultados.

8.1. Aportaciones y conclusiones.

Las principales aportaciones y propuestas desarrolladas en la presente tesis se pueden resumir en los siguientes puntos presentando en cada punto sus conclusiones más relevantes:

- Se proponen unas nuevas expresiones para las magnitudes de voltaje, corriente, y potencia incluidas en la IEEE Std. 1459-2010. Con las nuevas expresiones propuestas se evitan las inconsistencias de cálculo que presentan las definiciones incluidas en la IEEE Std. 1459-2010. Las inconsistencias encontradas se han demostrado en la tesis mediante casos concretos que producían resultados erróneos respecto a definiciones comúnmente aceptadas por la comunidad científica. Las principales modificaciones son realizadas en el voltaje efectivo y la corriente efectiva. El nuevo voltaje efectivo ($V_{e\#}$) es obtenido sin tener en cuenta las tensiones compuestas. La nueva corriente efectiva ($I_{e\#}$) es obtenida sin tener en cuenta la corriente del neutro. Las nuevas magnitudes de potencia son calculadas teniendo en cuenta las nuevas expresiones de $V_{e\#}$ e $I_{e\#}$.
- Se propone un nuevo procedimiento de cálculo para las magnitudes de potencia que cuantifican el desequilibrio y la asimetría de los sistemas eléctricos propuestas por [23]. Con este nuevo procedimiento de cálculo se obtienen nuevas expresiones para $S_{UI\#}$ y $S_{UIV\#}$. La nueva potencia $S_{UI\#}$ cuantifica mejor la demanda de potencia provocada por corrientes desequilibradas. La nueva potencia $S_{UIV\#}$ cuantifica mejor la demanda de potencia provocada por tensiones asimétricas. Estas nuevas magnitudes permitirán discriminar mejor las potencias ineficientes provocadas principalmente por el usuario final ($S_{UI\#}$) de las potencias ineficientes que nos impone la propia red de suministro ($S_{UIV\#}$).
- Se propone el uso de la teoría de la potencia instantánea como teoría de potencia que sirve simultáneamente para medir, cuantificar, evaluar la calidad de la potencia y diseñar compensadores activos, e inclusive puede permitir determinar las fuentes de distorsión armónica en un determinado sistema eléctrico. El uso de la teoría de la potencia instantánea permite entender los flujos de potencia que existen en los sistemas eléctricos, determinando claramente los flujos de potencia que realmente contribuyen con la transferencia de potencia útil de la red de suministro a la carga.

Los desarrollos realizados mediante el uso de la teoría de la potencia instantánea confirmaron las nuevas expresiones de las diversas magnitudes modificadas respecto a la IEEE Std. 1459-2010, confirmando así mismo las nuevas magnitudes propuestas.

- Se proponen las corrientes de compensación a suministrar por el SAPC para la reducción global o selectiva de las potencias ineficientes que demanda la carga. La compensación selectiva puede usarse en situaciones en las que se supera el límite de potencia del SAPC. Para implementar la compensación selectiva de las ineficiencias demandadas por la carga se utilizaron coeficientes de escalado para cada uno de los términos de la corriente que se han identificado con las respectivas potencias ineficientes. Se desarrollaron los algoritmos que calculan los coeficientes de las corrientes de compensación selectiva cuando existe limitación de potencia del SAPC, variando los valores de dichos coeficientes según la estrategia de compensación elegida. Con los algoritmos desarrollados no se inyectan nuevas componentes de corriente armónica ni se ocasionan nuevos desequilibrios de las componentes de corriente.
- Se propone la utilización de SAPC's selectivos como herramienta eficaz para la compensación de forma individual o combinada de las potencias ineficientes demandadas por la carga. Con el prototipo experimental de SAPC fueron probadas todas las estrategias de compensación propuestas (G_T , S1, S2, S3, S4, S5, S6, G_L , y N). Los resultados experimentales son los esperados y coinciden con los resultados de simulación, demostrando la validez de los modelos propuestos. El SAPC implementado contribuye a la mejora de la calidad de la potencia al reducir o cancelar algunos de los problemas que surgen en los sistemas eléctricos.
- Se proponen criterios que justifican la selectividad en la compensación de las potencias ineficientes de la carga. También se propone una prioridad para el uso de los criterios de selectividad. La prioridad en la compensación depende si el SAPC selectivo es usado por las empresas de distribución de energía o por los usuarios finales. La prioridad en el uso de los criterios también depende de las necesidades que existan y de los problemas puntuales que se quieren resolver.
- Se propone el factor de uso UF como factor para evaluar la eficiencia en la transferencia de potencia desde el SAPC a la red eléctrica. El máximo aprovechamiento de la potencia disponible en el SAPC sucede cuando la potencia ineficiente demandada por la carga es igual a la potencia máxima que es capaz de suministrar el SAPC y ésta es suministrada en su totalidad a la carga.
- Acorde a las nuevas definiciones de potencia eléctrica, se proponen nuevos $THD_I's$ (THD_{eI*} , THD_{zI*}), nuevos $THD_V's$ (THD_{eV*} , y THD_{zV*}), y el factor de potencia total $P_{FT\#}$ como indicadores de mérito para valorar mejor la calidad de la potencia. Los

THD_I 's valoran mejor la distorsión de las ondas de corriente comparando componentes no fundamentales de corriente con I_1^{+a} , los THD_I 's no dependen de la variación de otras corrientes ineficientes. Los THD_V 's valoran mejor la distorsión de las ondas de tensión comparando componentes no fundamentales de tensión con V_1^+ , los THD_V 's no dependen de la variación de otras tensiones ineficientes. El factor $P_{FT\#}$ compara a P_1^+ (potencia eficiente) con $S_{e\#}$ (potencia aparente que engloba la totalidad de las potencias demandadas) y sirve para valorar la transferencia de potencia útil (eficiente) desde la red de suministro hacia la carga.

8.2. Líneas de trabajo futuro

Como continuación de la investigación realizada en los últimos años y plasmada en la presente tesis, se plantea para el futuro desarrollar los siguientes puntos:

- Desarrollar un sistema de control autónomo para los SAPC's selectivos que sea capaz de decidir cual es la estrategia de compensación que debe ejecutar utilizando los indicadores de los criterios de selectividad. El SAPC selectivo tendrá la opción de configurarse de acuerdo a las necesidades que se tengan y, con técnicas de evaluación y decisión multicriterio, escoger la estrategia de compensación que más convenga.
- Obtener nuevos factores de merito para evaluar la calidad de la potencia de los sistemas eléctricos con sistemas eléctricos que demandan corrientes no fundamentales desequilibradas y tensiones asimétricas distorsionadas. La nueva descomposición de las magnitudes de potencia permitirá cuantificar mejor cada uno de los fenómenos por separado y permitirá distinguir entre potencias armónicas provocadas por el usuario o impuestas por el sistema eléctrico.
- Desarrollar algoritmos de compensación selectiva para reducir de forma individual o combinada las distintas componentes de corriente armónica desequilibrada demandada por la carga. Basándose en la gravedad de los efectos provocados por cada componente de corriente se determinarán que componentes deben compensarse primero, disminuyendo al máximo los efectos perjudiciales y las pérdidas de potencia en los sistemas de distribución.
- Desarrollar un gestor energético principal que trabajando de forma remota sea capaz de decidir las acciones que deben llevar los SAPC's selectivos que dispone en el sistema eléctrico que gestiona. El SAPC selectivo además de tomar decisiones de acuerdo a las medidas locales podrá integrarse al sistema global satisfaciendo sus necesidades o requerimientos. Con el nuevo gestor energético remoto, los SAPC's selectivos se vuelven más versátiles y se pueden establecer nuevos criterios de compensación selectiva.
- Desarrollar un sistema de medidas de altas prestaciones basado en la propuesta para el cálculo de las magnitudes de voltaje, corriente, y potencia desarrollada en el capítulo 1, sección 1.2.3.4. El nuevo sistema de medidas estará integrado con el SAPC y calculará las corrientes de compensación. Estas medidas podrán ser transferidas y utilizadas por el gestor remoto para la toma de decisiones sobre el modo de operación que debe adoptar cada SAPC de su sub-red para alcanzar la máxima calidad de suministro eléctrico en su zona de actuación.

- Desarrollar un procedimiento de análisis de los sistemas eléctricos con el que se puedan detectar las fuentes de distorsión armónica. Basándose en la teoría de la potencia instantánea propuesta en el capítulo 2, realizar un estudio de los flujos de energía existentes para establecer un procedimiento que permita detectar el origen de los flujos de potencia ineficiente en los sistemas de distribución.

8.3. Publicaciones derivadas de la tesis doctoral.

Las publicaciones que se citan a continuación se derivan de parte del trabajo realizado en la presente tesis.

1) Non-fundamental Effective Apparent Power Defined Through an Instantaneous Power Approach.

N. Muñoz-Galeano, J.C. Alfonso-Gil, S. Orts-Grau, S. Seguí-Chilet y F. J. Gimeno-Sales.

Revista: *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*. ELSEVIER (Ranking JCR: 67 (primer tercio), Factor de Impacto: 1.613)

Aceptado para publicación 28 de enero de 2011. Número de referencia IJEPES-D-09-00178.

2) Meaningful Resolution of the IEEE Std. 1459 Unbalanced Power.

S. Orts-Grau, N. Muñoz-Galeano, J.C. Alfonso-Gil, Fco. S. Seguí-Chilet y F.J Gimeno-Sales.

Revista: *IEEE Transactions on Power Systems*. (Ranking JCR: 47 (primer tercio), Factor de Impacto: 1.938)

Enviado el 2 de junio de 2010. Aceptado y en prensa desde agosto 2010. Fecha de publicación estimada durante 2011. Identificador digital del artículo: 10.1109/TPWRS.2010.2091326.

3) Discussion on Useless Active and Reactive Powers Contained in the IEEE Std 1459.

S. Orts-Grau, N. Muñoz-Galeano, J.C. Alfonso-Gil, Fco. J. Gimeno-Sales y S. Seguí-Chilet.

Revista: *IEEE Transactions on Power Delivery*. (Ranking JCR: 105 (segundo tercio), Factor de Impacto: 1.161)

Enviado el 30 de junio de 2009. Primera revisión el 7 de junio de 2010. Aceptado el 19 de noviembre de 2010. En prensa desde enero de 2011. Identificador digital del artículo: 10.1109/TPWRD.2010.2096519.

9. Referencias.

- [1] S. Fryze, "Active, reactive and apparent power in non-sinusoidal systems", *Przeglad Elektrot.*, no. 7, pp.193-203, Polonia, 1931.
- [2] C. I. Budeanu, "Reactive and fictitious powers", *Inst. Romain de l'Energie*, Bucharest, Rumania, 1927.
- [3] F. Buchholz, "Das begriffsystem rechtleistung. Wirkleistung, totale blindleistung", Munich, Germany: Selbstverlag, 1950.
- [4] IEC 60050 International Electrotechnical Vocabulary (IEV).
- [5] IEEE Standard dictionary of electrical and electronics terms. ANSI/IEEE Std. 100-1988.
- [6] L. S. Czarnecki, "What is wrong with the Budeanu concept of reactive and distortion power and why it should be abandoned", *IEEE Trans. on Instrumentation and measurement*, vol. 36, pp. 1845-1854, Sept. 1987.
- [7] L. S. Czarnecki, "Distortion power in systems with non-sinusoidal voltages", *IEE Elect. Power Applicat.*, vol. 139, pp. 276-280, 1992.
- [8] D. Yildirim, E. F. Fuchs, "Commentary on various formulations of distortion power D", *IEEE Power Engineering*, vol. 19, pp. 50-52, May. 1999.
- [9] W. Shepherd, P. Zakikhani, "Suggested definition of reactive power for nonsinusoidal systems". *Proceedings of the Institution of Electrical Engineers*, vol. 119, no. 9, pp. 1361-1362, Sept. 1972.
- [10] N. L. Kusters, W. J. M. Moore, "On the definition of reactive power under non-sinusoidal conditions", *IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems*, vol. PAS-99, no. 5, pp. 1845-1854, Sept. 1980.
- [11] Z. Nowomiejski, "Generalized theory of electrical power", *Arch. Elecktrotech*, vol. 3, pp.177-182, 1981.

- [12] C.H. Page, "Reactive power in nonsinusoidal situation," IEEE Trans. on Instrumentation and Measurement, vol. 29, no. 4, pp. 420–423, Dec. 1980.
- [13] P. Filipski, "A new approach to reactive current and reactive power measurement in nonsinusoidal systems," IEEE Trans. on Instrumentation and Measurement, vol. 29, no. 4, pp. 423–426, Dec. 1980.
- [14] H. Akagi, Y. Kanazawa, A. Nabae, "Generalized theory of the instantaneous reactive power in the three-phase circuits," Proceedings International Power Engineering Conference, pp. 1375-1386, 1983.
- [15] H. Akagi, Y. Kanazawa, A. Nabae, "Instantaneous reactive power compensator comprising switching devices without energy storage components," IEEE Trans. on Industrial Applications, vol. 20, pp. 625-630, 1984.
- [16] J. L. Willems, "A new interpretation on the Akagi-Nabae power components for nonsinusoidal three-phase situations," IEEE Trans. on Instrumentation and Measurement, vol. 41, pp. 523-527, Aug. 1992.
- [17] S. Togasawa, T. Murase, H. Nakano, and A. Nabae, "Reactive power compensation based on a novel cross-vector theory," IEEJ Trans. on Industrial Applications, vol. 114, pp. 340-341, March 1994. (En Japonés)
- [18] F. Peng and J. Lai, "Generalized instantaneous reactive power theory for three-phase power systems," IEEE Trans. on Instrumentation and Measurement, vol. 45, pp. 293-297, Feb. 1996.
- [19] H. Kim, H. Akagi, "The instantaneous power theory on the rotating p-q-r reference frames", Proceedings of the IEEE International Conference on Power Electronics and Drive Systems, PEDS '99. vol. 1, pp. 422-427, Jul. 1999.
- [20] IEEE Working group in non-sinusoidal situations: Effects on meter of performance and definitions of power, "Practical definitions in systems with non-sinusoidal waveforms and unbalanced loads: a discussion," IEEE Trans. on Power Delivery, vol. 11, no. 1, pp. 79-87, Jan. 1996.
- [21] IEEE Standard Definitions for the Measurement of Electric Power Quantities Under Sinusoidal, Nonsinusoidal, Balanced, or Unbalanced Conditions, IEEE Std 1459-2010 (Revision of IEEE Std 1459-2000), pp. 1-40.

- [22] J. C. F. de León, "Inconsistencias de las Definiciones de Potencia y Factor de Potencia en Circuitos No Lineales y/o Desbalanceados ¿Es la Nueva Norma IEEE 1459-2000 la Solución?," Ponencia IEEE sección México, pp. 1-7, 2002.
- [23] S. Orts, S. Seguí-Chilet, F. J. Gimeno-Sales, and J. C. Alfonso-Gil, "New Resolution of the Unbalanced Power according to Std 1459," Power Delivery, IEEE Transactions on, vol. 25, pp. 341-350, 2010
- [24] W. G. Morsi and M. E. El-Hawary, "Reformulating Three-Phase Power Components Definitions Contained in the IEEE Standard 1459–2000 Using Discrete Wavelet Transform," Power Delivery, IEEE Transactions on, vol. 22, pp. 1917-1925, 2007.
- [25] L. S. Czarnecki, "Could power properties of three-phase systems be described in terms of the Poynting vector?," Power Delivery, IEEE Transactions on, vol. 21, pp. 339-344, 2006.
- [26] J. L. Willems, J. A. Ghijselen, and A. E. Emanuel, "The apparent power concept and the IEEE standard 1459-2000," Power Delivery, IEEE Transactions on, vol. 20, pp. 876-884, 2005.
- [27] R. Arseneau, "Calibration system for power quality instrumentation," in Power Engineering Society Summer Meeting, 2002 IEEE, 2002, pp. 1686-1689 vol.3.
- [28] M. B. Hughes, "Electric power measurements-a utility's perspective," in Power Engineering Society Summer Meeting, 2002 IEEE, 2002, pp. 1680-1681 vol.3.
- [29] R. Arseneau, "Application of IEEE standard 1459-2000 for revenue meters," in Power Engineering Society General Meeting, 2003, IEEE, 2003, pp. 87-91 Vol. 1.
- [30] G. N. Stenbakken, T. L. Nelson, T. L. Waltrip, and D. I. Bergman, "NIST program for traceable power and energy measurements under non-sinusoidal waveform conditions," in Power Engineering Society General Meeting, 2003, IEEE, 2003, p. 96 Vol. 1.
- [31] A. Cataliotti, V. Cosentino, and S. Nuccio, "A time domain approach for IEEE Std 1459-2000 powers measurement in distorted and unbalanced power systems," in Instrumentation and Measurement Technology Conference, 2004. IMTC 04. Proceedings of the 21st IEEE, 2004, pp. 1388-1393 Vol.2.

- [32] C. N. Orfanos and F. V. Topalis, "Single-phase virtual power and energy analyzer in compliance with IEEE Std 1459–2000 for harmonic measurements on discharge lamps," in *Power Tech, 2005 IEEE Russia, 2005*, pp. 1-6.
- [33] A. C. Moreira, S. M. Deckmann, F. P. Marafao, E. G. De Lima, and M. A. Bini, "Virtual Instrumentation Applied to the Implementation of IEEE-STD 1459-2000 Power Definitions," in *Power Electronics Specialists Conference, 2005. PESC '05. IEEE 36th, 2005*, pp. 1712-1718.
- [34] A. Pigazo and V. M. Moreno, "Accurate and Computationally Efficient Implementation of the IEEE 1459-2000 Standard in Three-Phase Three-Wire Power Systems," *Power Delivery, IEEE Transactions on*, vol. 22, pp. 752-757, 2007.
- [35] V. V. Terzija, V. Stanojevic, M. Popov, and L. van der Sluis, "Digital Metering of Power Components According to IEEE Standard 1459-2000 Using the Newton-Type Algorithm," *Instrumentation and Measurement, IEEE Transactions on*, vol. 56, pp. 2717-2724, 2007.
- [36] A. Cataliotti, V. Cosentino, and S. Nuccio, "A Virtual Instrument for the Measurement of IEEE Std. 1459-2000 Power Quantities," *Instrumentation and Measurement, IEEE Transactions on*, vol. 57, pp. 85-94, 2008.
- [37] V. V. Terzija and V. Stanojevic, "STLS Algorithm for Power-Quality Indices Estimation," *Power Delivery, IEEE Transactions on*, vol. 23, pp. 544-552, 2008.
- [38] S. Seguí-Chilet, F. J. Gimeno-Sales, S. Orts, G. Garcera, E. Figueres, M. Alcañiz, and R. Masot, "Approach to unbalance power active compensation under linear load unbalances and fundamental voltage asymmetries," *Electrical Power and Energy Systems ELSEVIER*, vol. 29, pp. 526-539, 2007.
- [39] S. Orts, F. J. Gimeno-Sales, A. Abellan, S. Seguí-Chilet, M. Alcaniz, and R. Masot, "Achieving maximum efficiency in three-phase systems with a shunt active power compensator based on IEEE Std. 1459," *Power Delivery, IEEE Transactions on*, vol. 23, pp. 812-822, 2008.
- [40] A. E. Emanuel and D. L. Milanez, "Clarke's alpha, beta and zero components: a possible approach for the conceptual design of instrumentation compatible with IEEE std. 1459-2000," in *Instrumentation and Measurement Technology*

- Conference, 2004. IMTC 04. Proceedings of the 21st IEEE, 2004, pp. 1614-1619 Vol.3.
- [41] C. L. Fortescue, "Method of symmetrical coordinates applied to the solution of polyphase networks," *Trans. AIEE*, pt II, vol 37, pp. 1027-1140, 1918.
- [42] C. Gianfranco, P. Petru, and T. Cornel, "Analysis of Three-Phase Systems With Neutral Under Distorted and Unbalanced Conditions in the Symmetrical Component-Based Framework," *Power Delivery, IEEE Transactions on*, vol. 22, pp. 674-683, 2007.
- [43] A. E. Emanuel, "Apparent and Reactive Powers in Three-Phase Systems: In Search of a Physical Meaning and a Better Resolution," *ETEP*, vol. 3, pp. 7-14, 1993.
- [44] F. L. Tofoli, S. M. R. Sanhueza, and A. de Oliveira, "On the study of losses in cables and transformers in nonsinusoidal conditions," *Power Delivery, IEEE Transactions on*, vol. 21, pp. 971-978, 2006.
- [45] D. E. Rice, "Adjustable Speed Drive and Power Rectifier Harmonics ¿Their Effect on Power Systems Components," *Industry Applications, IEEE Transactions on*, vol. IA-22, pp. 161-177, 1986.
- [46] J. C. Montano, P. Salmeron, and J. P. Thomas, "Analysis of power losses for instantaneous compensation of three-phase four-wire systems," *Power Electronics, IEEE Transactions on*, vol. 20, pp. 901-907, 2005.
- [47] Reglamento electrotécnico para baja tensión, edición 1ª 2010.
- [48] UNE-EN 20460 "Instalaciones eléctricas en edificios".
- [49] J.L. Willems, "Reflections on apparent power and power factor in nonsinusoidal and polyphase situations," *IEEE Trans. Power Delivery*, vol. 19, no. 2, pp. 835–840, Apr. 2004.
- [50] *Insulated Power Cable Engineers Association Handbook*, P-43-457, July 16 1959.
- [51] S. Svensson, "Preferred methods for power-related measurements," in *Harmonics And Quality of Power, 1998. Proceedings. 8th International Conference on*, 1998, pp. 238-243 vol.1.

- [52] H. Akcay and D. G. Ece, "Modeling of hysteresis and power losses in transformer laminations," *Power Delivery, IEEE Transactions on*, vol. 18, pp. 487-492, 2003.
- [53] "IEEE Standard Test Code for Liquid-Immersed Distribution, Power, and Regulating Transformers," *IEEE Std C57.12.90-2006*, pp. 1-94, 2006.
- [54] "IEEE standard test code for dry-type distribution and power transformers," *IEEE Std C57.12.91-1995*, 1996.
- [55] D. M. Said and K. M. Nor, "Effects of harmonics on distribution transformers," in *Universities Power Engineering Conference, 2008. AUPEC '08. Australasian*, 2008, pp. 1-5.
- [56] "IEEE recommended practice for establishing transformer capability when supplying nonsinusoidal load currents," *IEEE Std C57.110-1998*, 1998.
- [57] F. Townsend, "Eddy Current Losses in Transformers," *American Institute of Electrical Engineers, Transactions of the*, vol. XVII, pp. 319-334, 1900.
- [58] A. N. de Souza, I. N. da Silva, C. F. L. N. de Souza, and M. G. Zago, "Using artificial neural networks for identification of electrical losses in transformers during the manufacturing phase," in *Neural Networks, 2002. IJCNN '02. Proceedings of the 2002 International Joint Conference on*, 2002, pp. 1346-1350.
- [59] S. N. Makarov and A. E. Emanuel, "Corrected harmonic loss factor for transformers supplying nonsinusoidal load currents," in *Harmonics and Quality of Power, 2000. Proceedings. Ninth International Conference on*, 2000, pp. 87-90 vol.1.
- [60] A. Noreika and P. Tarvydas, "Electromagnetic field modeling using edge finite elements," in *Electronics Conference, 2008. BEC 2008. 11th International Biennial Baltic*, 2008, pp. 99-102.
- [61] C. R. Sullivan, "Computationally efficient winding loss calculation with multiple windings, arbitrary waveforms, and two-dimensional or three-dimensional field geometry," *Power Electronics, IEEE Transactions on*, vol. 16, pp. 142-150, 2001.
- [62] C. R. Sullivan, "Winding loss calculation with multiple windings, arbitrary waveforms, and two-dimensional field geometry," in *Industry Applications*

- Conference, 1999. Thirty-Fourth IAS Annual Meeting. Conference Record of the 1999 IEEE*, 1999, pp. 2093-2099 vol.3.
- [63] A. Van den Bossche, V. C. Valchev, and S. T. Barudov, "Practical Wide Frequency Approach for Calculating Eddy Current Losses in Transformer Windings," in *Industrial Electronics, 2006 IEEE International Symposium on*, 2006, pp. 1070-1074.
- [64] H. Oraee, "A quantitative approach to estimate the life expectancy of motor insulation systems," *Dielectrics and Electrical Insulation, IEEE Transactions on*, vol. 7, pp. 790-796, 2000.
- [65] T. L. Mthombeni and P. Pillay, "Lamination core losses in motors with nonsinusoidal excitation with particular reference to PWM and SRM excitation waveforms," *Energy conversion, IEEE transactions on*, vol. 20, pp. 836-843, 2005.
- [66] R. Kaczmarek, M. Amar, and F. Protat, "Iron loss under PWM voltage supply on Epstein frame and in induction motor core," *Magnetics, IEEE Transactions on*, vol. 32, pp. 189-194, 1996.
- [67] Z. Baofeng, B. Baodong, and H. Huiming, "Effects of the inverter parameters on the eddy current losses in induction motor fed by PWM inverter," in *Electrical Machines and Systems, 2008. ICEMS 2008. International Conference on*, 2008, pp. 4240-4243.
- [68] M. A. E. Alali, Y. A. Chapuis, S. Saadate, and F. Braun, "Advanced common control method for shunt and series active compensators used in power quality improvement," *Electric Power Applications, IEE Proceedings -*, vol. 151, pp. 658-665, 2004.
- [69] D. Ionel, M. Popescu, C. Cossar, M. I. McGilp, A. Boglietti, and A. Cavagnino, "A General Model of the Laminated Steel Losses in Electric Motors with PWM Voltage Supply," in *Industry Applications Society Annual Meeting, 2008. IAS '08. IEEE*, 2008, pp. 1-7.
- [70] S. Heng Phalla, "Method for determining losses and efficiency of three-phase cage induction motors," in *Testing of Electrical Machines (Ref. No. 1999/161), IEE Half Day Colloquium on*, 1999, pp. 2/1-2/4.

- [71] D. Jiang and D. Taihang, "Research on voltage-reduce energy saving strategy for three-phase induction motor," in *Electrical Machines and Systems, 2008. ICEMS 2008. International Conference on*, 2008, pp. 91-93.
- [72] "IEEE Standard Test Procedure for Polyphase Induction Motors and Generators," *IEEE Std 112-2004 (Revision of IEEE Std 112-1996)*, pp. 0_1-79, 2004.
- [73] N. Stranges and R. D. Findlay, "Methods for predicting rotational iron losses in three phase induction motor stators," *Magnetics, IEEE Transactions on*, vol. 36, pp. 3112-3114, 2000.
- [74] K. Fujisaki, R. Hirayama, T. Kawachi, S. Satou, C. Kaidou, M. Yabumoto, and T. Kubota, "Motor Core Iron Loss Analysis Evaluating Shrink Fitting and Stamping by Finite-Element Method," *Magnetics, IEEE Transactions on*, vol. 43, pp. 1950-1954, 2007.
- [75] G. YouGuang, Z. Jian Guo, L. Zhi Wei, and Z. Jin Jiang, "Measurement and modeling of core losses of soft magnetic composites under 3-D magnetic excitations in rotating motors," *Magnetics, IEEE Transactions on*, vol. 41, pp. 3925-3927, 2005.
- [76] M. Lei, M. Sanada, S. Morimoto, and Y. Takeda, "Prediction of iron loss in rotating machines with rotational loss included," *Magnetics, IEEE Transactions on*, vol. 39, pp. 2036-2041, 2003.
- [77] R. D. Findlay, N. Stranges, and D. K. MacKay, "Losses due to rotational flux in three phase induction motors," *Energy conversion, iee transactions on*, vol. 9, pp. 543-549, 1994.
- [78] S. Bobbio, A. Del Pizzo, F. Marignetti, and E. Pagano, "Eddy current iron losses in axially laminated brushless motors," *Electric Power Applications, IEE Proceedings* -, vol. 142, pp. 183-190, 1995.
- [79] F. Townsend, "Eddy Current Losses in Transformers," *American Institute of Electrical Engineers, Transactions of the*, vol. XVII, pp. 319-334, 1900.
- [80] L. T. Mthombeni and P. Pillay, "Core losses in motor laminations exposed to high-frequency or nonsinusoidal excitation," *Industry Applications, IEEE Transactions on*, vol. 40, pp. 1325-1332, 2004.

- [81] K. Dabala, "Analysis of mechanical losses in three-phase squirrel-cage induction motors," in *Electrical Machines and Systems, 2001. ICEMS 2001. Proceedings of the Fifth International Conference on*, 2001, pp. 39-42 vol.1.
- [82] N. Urasaki, T. Senjyu, and K. Uezato, "Investigation of influences of various losses on electromagnetic torque for surface-mounted permanent magnet synchronous motors," *Power Electronics, IEEE Transactions on*, vol. 18, pp. 131-139, 2003.
- [83] A.E. Emanuel, "Summary of IEEE Standard 1459: definitions for measurement of electric power quantities under sinusoidal, nonsinusoidal, balanced, or unbalanced conditions," *IEEE Trans. on Ind. Applications*, vol. 40, no. 3, pp. 869-876, Mayo / Junio 2004.
- [84] L. S. Czarnecki, "Energy flow and power phenomena in electrical circuits: illusions and reality", *Electrical Engineering (Springer-Verlag)*, No. 82, pp. 119–126, 2000.
- [85] S. Segui-Chilet, F. J. Gimeno-Sales, S. Orts, M. Alcañiz, and R. Masot, "Selective shunt active power compensator in four wire electrical systems using symmetrical components", *Electric Power Components and Systems*, vol. 35, no. 1, pp. 97–118, Jan. 2007.
- [86] Fco. J. Gimeno, S. Seguí; "Procesador digital de señal DSP TMS320LF240x. Arquitectura y aplicaciones"; Editorial de la Universidad Politécnica de Valencia; ISBN: 84-9705-451-2.
- [87] Salvador Orts Grau "Sistema de compensación mediante filtro activo de potencia con sistema de obtención de las corrientes de referencia selectivo utilizando control 3D-3B de la etapa de potencia. Aplicación a sistemas industriales a 4 hilos" Universidad Politécnica de Valencia, departamento de Ingeniería Electrónica. Tesis doctoral 2008.
- [88] H. Akagi, E.H. Watanabe, and M. Aredes, *Instantaneous Power Theory and Applications to Power Conditioning*, Wiley-IEEE Press, Abril 2007.
- [89] A. Nabae, T. Tanaka, "A new definition of instantaneous active reactive current and a power based on instantaneous space vectors on polar coordinates in three phase circuits", *IEEE Trans. on Power Delivery*, vol. 11, no. 3, pp. 1238–1243, Jul. 1996.

- [90] M. Aredes, E. H. Watanabe, "New control algorithms for series and shunt three-phase four-wire active power filters", *IEEE Trans. on Power Delivery*, vol. 10, no. 3, pp. 1649-1656, Jul. 1995.
- [91] J. C. M. Asquerino and P. S. Revuelta, "Strategies of instantaneous compensation for three-phase four-wire circuits," *Power Delivery, IEEE Transactions on*, vol. 17, pp. 1079-1084, 2002.
- [92] B. Singh and V. Verma, "Selective Compensation of Power-Quality Problems Through Active Power Filter by Current Decomposition," *Power Delivery, IEEE Transactions on*, vol. 23, pp. 792-799, 2008.
- [93] S. George and V. Agarwal, "Optimum Control of Selective and Total Harmonic Distortion in Current and Voltage Under Nonsinusoidal Conditions," *Power Delivery, IEEE Transactions on*, vol. 23, pp. 937-944, 2008.
- [94] S. George and V. Agarwal, "A novel, DSP based algorithm for optimizing the harmonics and reactive power under non-sinusoidal supply voltage conditions," *Power Delivery, IEEE Transactions on*, vol. 20, pp. 2526-2534, 2005.
- [95] S. Orts-Grau, F. J. Gimeno-Sales, S. Segui-Chilet, A. Abellan-Garcia, M. Alcaniz, and R. Masot-Peris, "Selective Shunt Active Power Compensator Applied in Four-Wire Electrical Systems Based on IEEE Std. 1459," *Power Delivery, IEEE Transactions on*, vol. 23, pp. 2563-2574, 2008.
- [96] G. Casaravilla, A. Salvia, C. Briozzo, and E. H. Watanabe, "Selective active filter with optimum remote harmonic distortion control," *Power Delivery, IEEE Transactions on*, vol. 19, pp. 1990-1997, 2004.
- [97] L. Asiminoaei, F. Blaabjerg, and S. Hansen, "Detection is key - Harmonic detection methods for active power filter applications," *Industry Applications Magazine, IEEE*, vol. 13, pp. 22-33, 2007.
- [98] A. G. Exposito, J.A.R. Macias, "Fast harmonic computation for digital relaying", *IEEE Trans. on Power Delivery*, vol. 14, no. 4, pp. 1263-1268, Oct. 1999.
- [99] IEEE Std 519-1992, Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power Systems, IEEE, New York, 1993.

- [100] L. S. Czarnecki, "On some misinterpretations of the instantaneous reactive power p-q theory," *Power Electronics, IEEE Transactions on*, vol. 19, pp. 828-836, 2004.
- [101] A.E. Emanuel, "Introduction to IEEE Trial-Use Standard 1459-2000," in *IEEE Power Engineering Society Summer Meeting*, vol. 3, pp. 1674–1676, July 25, 2002.
- [102] H. Xuehao and Z. Yan, "Study of Impacts of Two Types' Distributed Generation on Distribution Network Voltage Sags," in *Power System Technology and IEEE Power India Conference, 2008. POWERCON 2008. Joint International Conference on*, 2008, pp. 1-5.
- [103] B. P. Muni, S. Eswar Rao, and J. V. R. Vithal, "SVPWM Switched DSTATCOM for Power Factor and Voltage Sag Compensation," in *Power Electronics, Drives and Energy Systems, 2006. PEDES '06. International Conference on*, 2006, pp. 1-6.
- [104] V. Khadkikar and A. Chandra, "A Novel Control Approach for Unified Power Quality Conditioner Q without Active Power Injection for Voltage Sag Compensation," in *Industrial Technology, 2006. ICIT 2006. IEEE International Conference on*, 2006, pp. 779-784.
- [105] S. Naetiladdanon, "Design considerations of DSTATCOM for voltage sag compensation without interaction," in *Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology, 2008. ECTI-CON 2008. 5th International Conference on*, 2008, pp. 989-992.
- [106] E. R. Collins and J. Jian, "Voltage Sags and the Response of a Synchronous Distributed Generator: A Case Study," *Power Delivery, IEEE Transactions on*, vol. 23, pp. 442-448, 2008.
- [107] UNE-EN 50160 "Características de la tensión suministrada por las redes generales de distribución".
- [108] Procedimiento Operativo 12.3 (P.O 12.3) "Requisitos de respuesta frente a huecos de tensión de las instalaciones eólicas". BOE núm 254, resolución 4 octubre de 2006.
- [109] UNE-EN 62052-11 "Equipos de medida de energía eléctrica (C.A). Requisitos generales, ensayos y condiciones de ensayo – parte 11: Equipos de medida".

- [110] UNE-EN 50470-1 “Equipos de medida de energía eléctrica (C.A). Parte 1: Requisitos generales, ensayos y condiciones de ensayo. Equipos de medida (Indices de clase A, B, y C).
- [111] UNE-EN 50470-2 “Equipos de medida de energía eléctrica (C.A). Parte 2: Requisitos particulares. Contadores electromecánicos de energía activa (Indices de clase A y B).
- [112] UNE-EN 50470-3 “Equipos de medida de energía eléctrica (C.A). Parte 3: Requisitos particulares. Contadores estáticos de energía activa (Indices de clasificación A, B, y C).
- [113] UNE-EN 62053-21 “Equipos de medida de energía eléctrica (C.A). Parte 21: Requisitos particulares. Contadores estáticos de energía activa (clases 1 y 2).
- [114] UNE-EN 62053-22 “Equipos de medida de energía eléctrica (C.A). Parte 22: Requisitos particulares. Contadores estáticos de energía activa (clases 0,2 S y 0,5 S).
- [115] UNE-EN 62053-23 “Equipos de medida de energía eléctrica (C.A). Parte 23: Requisitos particulares. Contadores estáticos de energía activa (clases 2 y 3).
- [116] M. D. Kusljevic, J. J. Tomic, and D. P. Marcetic, "Active power measurement algorithm for power system signals under non-sinusoidal conditions and wide-range frequency deviations," *Generation, Transmission & Distribution, IET*, vol. 3, pp. 57-65, 2009.
- [117] L. G. Durnte and P. K. Ghosh, "Active power measurement in nonsinusoidal environments," *Power Systems, IEEE Transactions on*, vol. 15, pp. 1142-1147, 2000.
- [118] A. Cataliotti, V. Cosentino, A. Lipari, S. Nuccio, “On the calibration of reactive energy meters under non sinusoidal conditions,” XIX IMEKO World Congress Fundamental and applied Metrology. September 6-11, 2009, Lisbon, Portugal.
- [119] Coste de producción de energía eléctrica y las tarifas de último recurso a aplicar en el primer semestre de 2010. BOE núm 315, 31 de diciembre de 2009.

Apéndice I: Índice de términos.

A continuación se enumeran y se describen las variables más utilizadas a lo largo de la tesis.

Sistemas monofásicos:

$v(t)$: voltaje instantáneo.

V : voltaje rms.

t : tiempo.

ω_1 : frecuencia angular fundamental.

f_1 : frecuencia fundamental.

$v_1(t)$: voltaje instantáneo fundamental.

V_1 : voltaje rms fundamental.

α_1 : ángulo o desfase de $v_1(t)$.

$i(t)$: corriente instantánea.

I : corriente rms.

β_1 : ángulo de $i_1(t)$ con respecto al ángulo de $v_1(t)$.

$i_1(t)$: corriente instantánea fundamental.

I_1 : corriente rms fundamental.

θ_1 : desfase o diferencia entre el ángulo de $i_1(t)$ y el ángulo de $v_1(t)$, ($\theta_1 = \beta_1 - \alpha_1$).

$p(t)$: potencia instantánea.

P : potencia activa.

- Q : potencia reactiva.
- S : potencia aparente.
- $p_1(t)$: potencia instantánea fundamental.
- $p_{a1}(t)$: potencia activa instantánea fundamental.
- $p_{q1}(t)$: potencia reactiva instantánea fundamental.
- P_1 : potencia activa fundamental.
- Q_1 : potencia reactiva fundamental.
- S_1 : potencia aparente fundamental.
- τ : tiempo inicial o tiempo de referencia.
- k : entero cualquiera para denotar uno de los periodos de tiempo.
- T : periodo completo de la señal fundamental.
- $v_H(t)$: voltaje instantáneo no fundamental.
- V_h : voltaje rms de la componente h -sima de voltaje.
- h : orden del armónico ($h=2,3,4,\dots,\infty$).
- α_h : ángulo de la componente h -sima de voltaje con respecto a $v_1(t)$, ($\alpha_1=0$).
- V_H : voltaje rms no fundamental.
- $i_H(t)$: corriente instantánea no fundamental.
- I_h : corriente rms de la componente h -sima de corriente.
- β_h : ángulo de la componente h -sima de corriente con respecto a $v_1(t)$, ($\alpha_1=0$).
- I_H : corriente rms no fundamental.

θ_h : desfase o diferencia entre el ángulo de $i_h(t)$ y el ángulo de $v_h(t)$, ($\theta_h = \beta_h - \alpha_h$).

P_H : potencia activa armónica.

Q_H : potencia reactiva armónica.

S_N : potencia aparente no fundamental.

D_I : potencia de distorsión de corriente.

D_V : potencia de distorsión de voltaje.

S_H : potencia aparente armónica.

D_H : potencia aparente armónica residual.

m : orden de las componentes armónicas de voltaje.

n : orden de las componentes armónicas de corriente.

Sistemas trifásicos:

V_z : voltaje rms para la fase z , ($z=a,b,c$).

V_{zz} : voltaje rms compuesto de dos fases, ($zz=ab, bc, ca$).

V_e : voltaje efectivo.

I_z : corriente rms para la fase z , ($z=a,b,c$).

I_n : corriente rms para el neutro.

I_e : corriente efectiva.

$v_{z1}(t)$: voltaje instantáneo fundamental para la fase z , ($z=a,b,c$).

V_{z1} : voltaje rms fundamental para la fase z , ($z=a,b,c$).

$i_{z1}(t)$: corriente instantánea fundamental para la fase z , ($z=a,b,c$).

- I_{z1} : corriente rms fundamental para la fase z , ($z=a,b,c$).
- φ_z : fase inicial de los voltajes línea-neutro ($\varphi_a=0$, $\varphi_b=2\pi/3$, $\varphi_c=4\pi/3$).
- R_Y : resistencia equivalente para un sistema de conexión estrella (Y).
- P_Δ : pérdidas equivalentes en conexión delta (Δ).
- R_Δ : resistencia equivalente para un sistema de conexión delta (Δ).
- ΔP : pérdidas de potencia.
- P_Y : pérdidas equivalentes en conexión estrella (Y).
- r : resistencia para los conductores de las fases.
- r_n : resistencia para el conductor del neutro.

Voltajes asimétricos y corrientes desequilibradas:

- $v_{z1}^+(t)$: voltaje instantáneo fundamental de secuencia positiva para la fase z , ($z=a,b,c$).
- $v_{z1}^-(t)$: voltaje instantáneo fundamental de secuencia negativa para la fase z , ($z=a,b,c$).
- $v_{z1}^0(t)$: voltaje instantáneo fundamental de secuencia cero para la fase z , ($z=a,b,c$).
- V_1^+ : voltaje rms fundamental de secuencia positiva.
- V_1^- : voltaje rms fundamental de secuencia negativa.
- V_1^0 : voltaje rms fundamental de secuencia cero.
- α_{z1}^+ : ángulo de $v_{z1}^+(t)$ con respecto a $v_{a1}^+(t)$ para la fase z , ($z=a,b,c$), ($\alpha_{a1}^+ = 0$).
- α_{z1}^- : ángulo de $v_{z1}^-(t)$ con respecto a $v_{a1}^+(t)$ para la fase z , ($z=a,b,c$).
- α_{z1}^0 : ángulo de $v_{z1}^0(t)$ con respecto a $v_{a1}^+(t)$ para la fase z , ($z=a,b,c$).
- $i_{z1}^+(t)$: corriente instantánea fundamental de secuencia positiva para la fase z , ($z=a,b,c$).

$i_{z1}^-(t)$: corriente instantánea fundamental de secuencia negativa para la fase z , ($z=a,b,c$).

$i_{z1}^0(t)$: corriente instantánea fundamental de secuencia cero para la fase z , ($z=a,b,c$).

I_1^+ : corriente rms fundamental de secuencia positiva.

I_1^- : corriente rms fundamental de secuencia negativa.

I_1^0 : corriente rms fundamental de secuencia cero.

β_{z1}^+ : ángulo de $i_{z1}^+(t)$ con respecto a $v_{a1}^+(t)$ para la fase z , ($z=a,b,c$).

β_{z1}^- : ángulo de $i_{z1}^-(t)$ con respecto a $v_{a1}^-(t)$ para la fase z , ($z=a,b,c$).

β_{z1}^0 : ángulo de $i_{z1}^0(t)$ con respecto a $v_{a1}^0(t)$ para la fase z , ($z=a,b,c$).

θ_{z1}^+ : desfase o diferencia entre el ángulo de $i_{z1}^+(t)$ y el ángulo de $v_{z1}^+(t)$ $\theta_{z1}^+ = \beta_{z1}^+ - \alpha_{z1}^+$.

θ_{z1}^- : desfase o diferencia entre el ángulo de $i_{z1}^-(t)$ y el ángulo de $v_{z1}^-(t)$ $\theta_{z1}^- = \beta_{z1}^- - \alpha_{z1}^-$.

θ_{z1}^0 : desfase o diferencia entre el ángulo de $i_{z1}^0(t)$ y el ángulo de $v_{z1}^0(t)$ $\theta_{z1}^0 = \beta_{z1}^0 - \alpha_{z1}^0$.

Magnitudes de potencia IEEE Std. 1459-2010. (Estas mismas variables con el subíndice # son las magnitudes propuestas en la sección 1.2.3.4).

S_e : potencia aparente efectiva.

S_{e1} : potencia aparente efectiva fundamental.

P_1 : potencia activa fundamental.

Q_1 : potencia reactiva fundamental.

S_{U1} : potencia de desequilibrio fundamental.

S_{UW} potencia aparente de desequilibrio.

S_{UV} potencia de desequilibrio de tensión.

S_{UI} potencia de desequilibrio de corriente.

- S_1^+ : potencia aparente fundamental de secuencia positiva.
- S_1^- : potencia aparente fundamental de secuencia negativa.
- S_1^0 : potencia aparente fundamental de secuencia cero.
- P_1^+ : potencia activa fundamental de secuencia positiva.
- P_1^- : potencia activa fundamental de secuencia negativa.
- P_1^0 : potencia activa fundamental de secuencia cero.
- Q_1^+ : potencia reactiva fundamental de secuencia positiva.
- Q_1^- : potencia reactiva fundamental de secuencia negativa.
- Q_1^0 : potencia reactiva fundamental de secuencia cero.
- S_{eN} : potencia aparente efectiva no fundamental.
- D_{eI} : potencia de distorsión de corriente.
- D_{eV} : potencia de distorsión de voltaje.
- S_{eH} : potencia aparente armónica.
- P_H : potencia activa armónica.
- Q_H : potencia reactiva armónica.
- D_{eH} : potencia aparente armónica residual.

