

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