



TESIS DOCTORAL

TÍTULO: *“Control Robusto basado en modelo de referencia de convertidores multinivel. Aplicación a Filtros Activos en conexión paralelo para corrección de armónicos en Redes Eléctricas de Media Tensión”*

Realizada por: Alejandro Munduate Tellería

Dirigida por: Gabriel Garcerá Sanfelú
Emilio Figueres Amorós

Fecha: Octubre 2007

Quisiera mostrar mi más sincera gratitud a todas las personas que me han apoyado durante estos años de duro trabajo en la realización de esta Tesis Doctoral.

En primer lugar me gustaría agradecer a Raúl Reyero el haber depositado su confianza en mí, incorporándome al Instituto Universitario de Investigación CIDAE, en el que he tenido la oportunidad de realizar la Tesis Doctoral. Agradecer también a Silverio Alvarez su paciencia a la hora de resolver mis dudas cuando daba mis primeros pasos en la Electrónica de Potencia, y a todo el resto del personal de CIDAE, por su apoyo técnico y por su amistad, en especial a Iñigo Garin. Gracias también a Luis Pedrosa, por su inestimable y desinteresada colaboración en la última etapa de la Tesis.

No quisiera dejar de agradecer a los miembros del Laboratorio de Electrónica de Potencia de la Universidad de Mondragón toda su colaboración durante estos años, y los buenos momentos compartidos.

Esta Tesis ha sido desarrollada en estrecha cooperación con la Universidad Politécnica de Valencia, y quiero destacar que me siento afortunado de haber sido dirigido por los Doctores Emilio Figueres y Gabriel Garcerá, por su gran valía profesional y personal. Gracias a los dos por toda la confianza que habéis depositado en mi, y por todo vuestro apoyo técnico y moral.

Quiero dar las gracias también a mis padres y hermanos, así como a mi amoña y a mis tíos, por haber estado ahí apoyándome siempre que los he necesitado, demostrándome todo su cariño y amor incondicional.

Por último, quiero expresar mi más profundo agradecimiento a mi mujer, Maite, ya que sin su paciencia y amor habría sido imposible llevar a buen puerto este barco. Y gracias también a mi hijo, Paul, que aunque es muy “peque” y no se da cuenta, es una continua inyección de moral.

De todo corazón, gracias a todos.

ÍNDICE

1	Introducción	1
2	Estado de la técnica.....	5
2.1	El problema de los armónicos de corriente	5
2.2	Componentes de potencia en condiciones no senoidales	9
2.2.1	Descomposición de potencia mediante valores eficaces.....	9
2.2.2	Descomposición de potencia mediante el método temporal.	12
2.2.3	Descomposición de potencia. Método p-q.	13
2.3	Convertidores multinivel.....	15
2.3.1	Tensiones de salida de un convertidor ideal de tres niveles.....	16
2.3.2	Convertidor DCI de tres niveles (NPC)	19
2.3.2.1	Estados posibles del convertidor.....	20
2.3.2.2	Influencia de la dinámica de los condensadores del Bus de continua.....	21
2.3.3	Convertidores DCI de más de tres niveles	26
2.3.4	Convertidor FLC de tres niveles	29
2.3.4.1	Estados posibles del convertidor.....	29
2.3.4.2	Influencia de la dinámica de los condensadores flotantes	31
2.3.5	Convertidores FLC de más de tres niveles.....	38
2.3.6	Convertidores de puentes-H en cascada.....	41
2.3.7	Convertidores de puentes-H en cascada de más de tres niveles.....	43
2.3.8	Síntesis comparativa de las tres topologías multinivel principales	46
2.4	Estrategias de modulación.....	51
2.4.1	Modulación PWM basada en portadora	51
2.4.1.1	Modulación PWM senoidal básica	51
2.4.1.2	Análisis de Fourier.....	56
2.4.1.3	Modulación de una rama de un convertidor de dos niveles	60
2.4.1.4	Modulación de un convertidor trifásico de dos niveles	62
2.4.1.5	Modulación de convertidores multinivel de puentes-H en cascada	65
2.4.1.6	Modulación de convertidores multinivel FLC	73
2.4.1.7	Modulación de convertidores multinivel DCI	74
2.4.1.8	Modulación equivalente a la PD PWM para convertidores en cascada.....	79
2.4.1.9	Modulación equivalente a la PD PWM para convertidores FLC.....	81
2.4.1.10	Relación de frecuencias y subarmónicos	85
2.4.1.11	Inyección de armónico de orden 3 en la señal de referencia.....	85
2.4.1.12	Influencia de la ubicación del pulso de salida.....	88
2.4.2	Modulación PWM vectorial	89

2.4.2.1	Representación vectorial de variables trifásicas	89
2.4.2.2	Modulación vectorial de convertidores trifásicos de dos niveles.....	92
2.4.2.3	Modulación vectorial de convertidores trifásicos multinivel.....	99
2.4.3	Comparación entre modulación PWM vectorial y basada en portadora.....	106
3	Objetivos de la Tesis	115
4	Modelado de un FAP basado en el convertidor NPC	117
4.1	Metodología de modelado	117
4.2	Función de transferencia para control de corriente.	120
4.3	Función de transferencia para control de tensión.....	126
4.4	aplicación del modelado a un caso concreto.	127
4.4.1	Características de la carga	128
4.4.2	Capacidad de los condensadores del Bus DC.	129
4.4.3	Inductancia de salida del convertidor.....	131
4.4.4	Funciones de transferencia resultantes.....	134
5	Estudio de nuevas alternativas para el control de las corrientes del FAP y de la tensión del Bus DC	136
5.1	Obtención de las corrientes de referencia	136
5.1.1	Método de la potencia reactiva instantánea (pq).....	137
5.1.2	Marco de referencia síncrono (SRF)	139
5.1.3	Transformada discreta de Fourier	141
5.2	Estructura del control de armónicos de corriente.....	142
5.3	Estructura del control de tensión de Bus.....	145
5.4	Breve Descripción del control PI convencional.....	149
5.5	Descripción del control robusto RMF propuesto	150
5.6	Descripción del control basado en Integradores Generalizados.....	152
5.7	Control en tiempo continuo de corriente y de tensión.	154
5.7.1	Control PI de corriente y de tensión.....	154
5.7.2	Control Robusto RMF de corriente y de tensión.....	156
5.7.3	Control de corriente basado en Integradores Generalizados.....	160
5.7.4	Análisis comparativo de los tres controles propuestos.....	162
5.8	Reajuste del control en tiempo continuo para discretización. Reguladores digitales 165	
5.8.1	Control PI de corriente y de tensión teniendo en cuenta el retardo digital. ...	166
5.8.2	Control Robusto RMF de corriente y de tensión teniendo en cuenta el retardo digital	170
5.8.3	Control de corriente basado en Integradores Generalizados teniendo en cuenta el retardo digital.....	175

5.8.4	Análisis comparativo de los tres controles propuestos teniendo en cuenta el retardo digital.....	177
6	Resultados de simulación	182
6.1	Control analógico de corriente y de tensión.....	183
6.1.1	Consideraciones previas.....	183
6.1.2	Control PI de corriente y de tensión.....	185
6.1.2.1	Régimen estacionario con tensión de línea equilibrada	185
6.1.2.2	Respuesta del convertidor frente a escalones de carga	186
6.1.3	Control Robusto RMF de corriente y de tensión.....	188
6.1.3.1	Régimen estacionario con tensión de línea equilibrada	188
6.1.3.2	Respuesta del convertidor frente a escalones de carga	189
6.1.4	Control PIS de corriente y control RMF de tensión.....	190
6.1.4.1	Régimen estacionario con tensión de línea equilibrada	191
6.1.4.2	Respuesta del convertidor frente a escalones de carga	191
6.1.5	Discusión de resultados obtenidos	192
6.1.5.1	Régimen estacionario con tensión de línea equilibrada	192
6.1.5.2	Respuesta del convertidor frente a escalones de carga	196
6.1.5.3	Conclusiones.....	197
6.2	Implementación digital de controladores de corriente y de tensión.....	198
6.2.1	Consideraciones previas.....	198
6.2.2	Control PI de corriente y de tensión.....	203
6.2.2.1	Régimen estacionario con tensión de línea equilibrada	203
6.2.2.2	Régimen estacionario con desequilibrio del 1% en tensión de línea	204
6.2.2.3	Régimen estacionario con desequilibrio del 10% en tensión de línea.	205
6.2.2.4	Respuesta del convertidor frente a escalones de carga	206
6.2.2.5	Respuesta frente a escalones de magnitud en la tensión de línea.....	207
6.2.3	Control Robusto RMF de corriente y de tensión.....	209
6.2.3.1	Régimen estacionario con tensión de línea equilibrada	209
6.2.3.2	Régimen estacionario con desequilibrio del 1% en tensión de línea.	210
6.2.3.3	Régimen estacionario con desequilibrio del 10% en tensión de línea.	210
6.2.3.4	Respuesta del convertidor frente a escalones de carga	211
6.2.3.5	Respuesta frente a escalones de magnitud en la tensión de línea.....	212
6.2.4	Control PIS de corriente y control RMF de tensión.....	214
6.2.4.1	Régimen estacionario con tensión de línea equilibrada	214
6.2.4.2	Régimen estacionario con desequilibrio del 1% en tensión de línea.	215
6.2.4.3	Régimen estacionario con desequilibrio del 10% en tensión de línea.	216
6.2.4.4	Respuesta del convertidor frente a escalones de carga	217
6.2.4.5	Respuesta frente a escalones de magnitud en la tensión de línea.....	217

6.2.5	Discusión de resultados obtenidos	218
6.2.5.1	Respuesta en régimen estacionario	218
6.2.5.2	Respuesta del convertidor frente a escalones de carga	228
6.2.5.3	Respuesta frente a escalones de magnitud en la tensión de línea.....	229
6.2.5.4	Conclusiones.....	231
7	Conclusiones y futuras líneas de investigación.....	232
7.1	Conclusiones	232
7.2	futuras líneas de investigación	236
8	Bibliografía.....	239
9	Publicaciones derivadas de la Tesis.....	250
10	Anexos.....	251
10.1	Corriente en los condensadores del Bus de un convertidor NPC.....	251
10.2	Expansión de Jacobi-Anger.....	259
10.3	Modulación equivalente a la convencional para un puente-H	261
10.4	Normativa reguladora de armónicos de corriente	264
10.4.1	Norma UNE-EN-61000-3-2.....	264
10.4.2	Norma IEC-61000-3-4	265
10.4.3	Norma IEEE 519-1992.....	268