

Universitat Politècnica de Catalunya

Departament d'Enginyeria Electrònica

**Aportación al Control del
Convertidor CC/CA de Tres Niveles**

Tesis Doctoral

presentada por

Salvador Alepuz Menéndez

para la obtención del grado de
Doctor Ingeniero Industrial

Director

Dr. Josep Bordonau Farrerons

Noviembre 2004

Resumen

La presente tesis estudia, propone y realiza sus principales aportaciones en el campo del control para el convertidor CC/CA de tres niveles, sobre la topología denominada *Neutral-Point-Clamped*, aunque se puede extender a otras topologías y/o número de niveles. Se presenta una metodología de modelado que emplea funciones de conmutación de fase, el operador de promediado y la transformación D-Q, tal que los modelos obtenidos en el dominio D-Q contienen una información completa sobre la dinámica del sistema. La estrategia de conmutación se puede entender como una extensión de la estrategia PWM senoidal de dos a tres niveles. Esta estrategia es simple y no realiza el control de ninguna de las variables del sistema. En esta tesis, el controlador se encarga de regular todas las variables del sistema, incluido el equilibrio del bus de continua. Este es un enfoque diferente del convencional, donde el equilibrio del bus de continua se consigue mediante la elección adecuada de los estados redundantes del convertidor en la estrategia de conmutación, mientras que el resto de variables se regulan a través del controlador. Para la realización del controlador, se propone la técnica de control lineal multivariable LQR (*Linear Quadratic Regulator*), complementada con la técnica de control no lineal adaptativo denominada programación de ganancia (*Gain Scheduling*). Se presenta, además, una metodología de cálculo del controlador. Este control es versátil, abierto y adaptable. En cualquier caso, el controlador se puede adaptar a las necesidades concretas de cada aplicación. El cálculo del controlador se realiza mediante simulación con MatLab-Simulink. Los modelos matemáticos que emplean las funciones de conmutación del convertidor son aquellos que ofrecen un mejor compromiso entre velocidad de simulación y precisión. Para validar el control propuesto, se ha diseñado y construido un equipo experimental donde el controlador se ha mostrado aplicable, útil y eficaz en la regulación de las distintas cargas y aplicaciones experimentadas, incluso con carga no lineal, bajo diferentes condiciones de trabajo y variables a controlar, tanto en régimen permanente como en procesos transitorios. La rapidez y calidad de la respuesta transitoria es comparable a la de otros sistemas de control publicados. Es especialmente interesante el excelente control conseguido del equilibrio del bus de continua. Además, la robustez del control permite cancelar el error estacionario aunque diferentes parámetros del sistema presenten desviaciones significativas respecto los valores esperados. El uso de la programación de ganancia junto con la técnica LQR se ha mostrado muy efectivo, puesto que permite realizar diferentes tipos de control. Se ha comprobado la congruencia entre simulaciones y resultados experimentales obtenidos, lo que valida los modelos de simulación empleados y el proceso de diseño del controlador mediante simulación.

Ver lo que tenemos delante de nuestras narices requiere una lucha constante.

George Orwell

La fuerza no proviene de la capacidad corporal, sino de una férrea voluntad.

Mahatma Gandhi

If you hate violence and don't believe in politics, the only major remedy remaining is education.
Perhaps society is past praying for, but there is always hope for the individual human being.

George Orwell

Agradecimientos

Deseo expresar mi agradecimiento al director de la tesis, Dr. Josep Bordonau, por su guía, sus inestimables consejos y por las enriquecedoras discusiones mantenidas. Deseo agradecerle especialmente su cordialidad permanente, además de su trato sencillo y amable.

Al Dr. Joan Peracaula, le agradezco su interés en la tesis y su afabilidad. Para mi, es un honor colaborar con quien ha desarrollado una trayectoria tan brillante en el campo de la electrónica.

Al Dr. Juan Manuel Moreno Eguílaz deseo agradecerle su decisiva ayuda en momentos cruciales y difíciles de la tesis.

Al Dr. Rafael Lamaison, le agradezco sus consejos desinteresados y sus palabras de ánimo.

A los compañeros de investigación, deseo agradecerles el cordial ambiente de colaboración y ayuda mutua. Agradezco a Joan Salaet su decisiva ayuda en la elección del equipo experimental. A Sergi Busquets, su apoyo en el análisis de la estrategia de conmutación y la realización del montaje con conexión a red. A José Antonio Beristáin y a Joan Rocabert, sus consejos y ayuda. Finalmente, agradezco especialmente a Alex Gilabert su ayuda en la realización y puesta a punto del equipo experimental, además de sus consejos y aportaciones. Su espíritu de colaboración, su profesionalidad y compañerismo constituyen un ejemplo a seguir.

A los compañeros docentes, agradezco su ayuda desinteresada. Al Dr. Miquel Roca y a Joan Triadó, agradezco sus consejos referentes al control. A Vicenç Delós, sus soluciones a problemas de laboratorio. A Julián Horrillo, sus consejos sobre DSP. A Amparo Sacristán, sus palabras de aliento. A los proyectistas César Murciano y Félix Creus, la construcción y puesta a punto del convertidor.

A Rosa deseo agradecer su apoyo y comprensión perenne e inquebrantable, su ayuda y sus consejos, su compañía y su cariño.

A mis padres, quiero agradecerles haberlo dado todo por mi. Han renunciado a una vida más cómoda por sus hijos. Esta tesis es el fruto de su sacrificio, trabajo y esfuerzo. A ellos está dedicada esta tesis.

A mis padres

Índice

Índice.....	I
Lista de figuras.....	VII
Lista de tablas.....	XVII
Glosario de acrónimos y abreviaturas.....	XIX
Glosario de símbolos y términos.....	XXI
Capítulo 1. Introducción.....	1
1.1. Motivación.....	1
1.2. Objetivos y alcance.....	3
1.3. Estructura de la tesis y aportaciones.....	4
Capítulo 2. Estado de la Técnica en Convertidores CC/CA Multinivel.....	7
2.1. Introducción a los convertidores CC/CA multinivel.....	7
2.2. Topologías de los convertidores multinivel.....	10
2.2.1. Convertidor <i>Diode-Clamped</i>	11
2.2.2. Convertidor <i>Flying-Capacitor</i>	15
2.2.3. Convertidor <i>Cascaded Full-Bridge</i>	19
2.2.4. Otras topologías.....	21
2.2.5. Comparación entre topologías.....	26
2.3. Estrategias de conmutación multinivel.....	26
2.3.1. Modulación en escalera.....	28
2.3.2. Cancelación selectiva de armónicos.....	28
2.3.3. Modulación PWM senoidal.....	30
2.3.4. Modulación vectorial (SVM).....	34
2.3.5. Otras técnicas de modulación.....	36
2.4. Control de los convertidores multinivel.....	37
2.4.1. Modelado de los convertidores multinivel.....	37
2.4.2. Ley de control o controlador.....	40
2.4.3. Equilibrado de la tensión de las capacidades.....	42
2.5. Aplicaciones.....	45
2.6. Resumen.....	49

Capítulo 3. Modelado del Convertidor CC/CA Multinivel	51
3.1. Consideraciones generales sobre el modelado	52
3.2. Proceso de modelado.....	53
3.2.1. Metodología de modelado.....	53
3.2.2. Pasos y supuestos en la metodología de modelado	56
3.3. Modelado de la topología NPC con filtro LC y carga R.....	57
3.3.1. Aplicación detallada del proceso de modelado. v_{pn} conocida	58
3.3.2. Modelo con corriente del bus de continua i_{DC} conocida	70
3.3.3. Modelo con 'N' conectado a 'o' e i_{DC} conocida.....	74
3.3.4. Modelo con 'N' conectado a 'o' y v_{pn} conocida	78
3.3.5. Modelo con 'N' conectado a 'o' a través de una inductancia.....	80
3.4. Modelado de la topología NPC con carga R.....	83
3.5. Modelado de la topología NPC con carga R-L	84
3.6. Modelado de la topología NPC con conexión a red.....	85
3.6.1. Modelo con i_{DC} conocida	86
3.6.2. Modelo con v_{pn} conocida.....	89
3.6.3. Modelo con 'N' conectado a 'o' e i_{DC} conocida.....	90
3.6.4. Modelo con 'N' conectado a 'o' y v_{pn} conocida	92
3.6.5. Modelo con 'N' conectado a 'o' a través de una inductancia.....	93
3.7. Extensión del modelo a N niveles	95
3.7.1. Número de niveles N impar	96
3.7.2. Número de niveles N par o impar	101
3.8. Conclusiones	105
Capítulo 4. Estrategia de Conmutación para el Convertidor CC/CA de Tres Niveles	107
4.1. Relación entre controlador y estrategia de conmutación.....	108
4.2. Diagrama general de control	108
4.3. PWM senoidal para un inversor de dos niveles	111
4.4. PWM senoidal para la topología NPC	114
4.4.1. Bloque transformación DQ/abc.....	114
4.4.2. Extensión de la modulación de dos a tres niveles	116
4.4.3. Simetría de operación en la estrategia de conmutación	120
4.5. Análisis general de la estrategia propuesta.....	123
4.5.1. Expresión general de las tensiones de salida.....	123
4.5.2. Tensiones de salida en régimen permanente	125
4.5.3. Límites de las relaciones de conducción 'dq0'.....	126
4.6. Grados de libertad de la estrategia en sistemas de neutro aislado.....	127
4.6.1. Criterios para la elección de las relaciones de conducción d_{p0} y d_{n0}	129
4.6.2. Límites en la elección de las relaciones de conducción d_{p0} y d_{n0}	130
4.6.3. Simplificación de los límites de d_{p0} y d_{n0}	132
4.6.4. Rutina de elección automática de las relaciones de conducción d_{p0} y d_{n0}	133

4.7. Generación de las señales de conmutación de los interruptores	135
4.7.1. Modulador PWM	135
4.7.2. Sistema digital.....	137
4.8. Análisis comparativo de la estrategia de conmutación	138
4.8.1. Ganancia de la estrategia o utilización del bus de continua.....	139
4.8.2. Número de conmutaciones por periodo de conmutación.....	139
4.8.3. Espectro armónico y distorsión armónica.....	140
4.8.4. Secuencia cero	148
4.9. Conclusiones	144

Capítulo 5. Controlador Multivariable para el Convertidor CC/CA de Tres Niveles..... 147

5.1. Propuestas de control para el convertidor NPC	148
5.1.1. Controladores descritos en la literatura.....	148
5.1.2. Controlador propuesto	148
5.2. Fundamentos del control LQR (<i>Linear Quadratic Regulator</i>)	150
5.2.1. Formulación general del control LQR	150
5.2.2. Obtención de la matriz $[K(t)]$. Ecuación de Riccati	151
5.2.3. LQR en régimen permanente	151
5.2.4. Condiciones para la existencia de solución en régimen permanente	152
5.2.5. Elección de las matrices $[Q]$ y $[R]$	153
5.2.6. Diagrama de bloques de aplicación del control LQR	154
5.2.7. LQR con acción integral	154
5.2.8. Robustez del control LQR	157
5.2.9. Límites y saturación en las variables de control y de estado	158
5.2.10. LQR discreto o digital.....	158
5.3. Fundamentos de la programación de ganancia (<i>Gain Scheduling</i>).....	160
5.3.1. Principios de la programación de ganancia	160
5.3.2. Diseño de reguladores con <i>Gain Scheduling</i>	160
5.3.3. Ventajas e inconvenientes de la técnica <i>Gain Scheduling</i>	161
5.4. Metodología de diseño del controlador propuesto	162
5.4.1. Paso 1. Identificación del sistema, modelado y variables a controlar.....	163
5.4.2. Paso 2. Valorar la incorporación de ' <i>Gain Scheduling</i> '.....	163
5.4.3. Paso 3. Diseño del LQR.....	164
5.4.4. Paso 4. Diseño de la programación de ganancia (<i>Gain Scheduling</i>).....	168
5.4.5. Paso 5. Valoración de la necesidad de elementos adicionales en el control.....	171
5.5. Ejemplo de aplicación del método de diseño: Control de tensión	172
5.5.1. Paso 1. Identificación del sistema, modelado y variables a controlar.....	172
5.5.2. Paso 2. Valorar la incorporación de ' <i>Gain Scheduling</i> '	174
5.5.3. Paso 3. Diseño del LQR	175
5.5.4. Paso 4. Diseño de la programación de ganancia (<i>Gain Scheduling</i>).....	186
5.6. Control de corriente	187

5.6.1. Planteamiento para el diseño del controlador en modo corriente	188
5.6.2. Diseño del controlador	188
5.6.3. Observaciones sobre el control en modo corriente	197
5.7. Control con carga no lineal	198
5.7.1. Estrategia para el cálculo del controlador con carga no lineal	199
5.8. Control del convertidor NPC con conexión a red	200
5.8.1. Paso 1. Identificación del sistema, modelado y variables a controlar	200
5.8.2. Paso 2. Valorar la incorporación de ' <i>Gain Scheduling</i> '	203
5.8.3. Paso 3. Diseño del LQR	204
5.9. Control del equilibrio del bus de continua	207
5.9.1. Expresión de la tensión de desequilibrio y su regulación	209
5.9.2. Regulación de la tensión de desequilibrio en el entorno multivariable.....	210
5.10. Conclusiones	211
Capítulo 6. Entorno de Simulación y Equipo Experimental	213
6.1. Entorno de simulación y programación del control	214
6.1.1. Necesidad y requerimientos del entorno de simulación y programación.....	214
6.1.2. Esquema general de simulación	215
6.2. Modelos de simulación para el convertidor	216
6.2.1. Modelo promediado del convertidor en el dominio D-Q.....	216
6.2.2. Modelo matemático 'abc' con funciones de conmutación	217
6.2.3. Modelo con la librería de Simulink ' <i>Power System Blockset</i> '	219
6.2.4. Comparación de los modelos de simulación para el convertidor.....	220
6.3. Descripción del equipo experimental	225
6.3.1. Entorno de control basado en DSP sobre plataforma PC.....	225
6.3.2. Modulador PWM en el equipo dSPACE	226
6.3.3. Panel de conexiones	229
6.3.4. Generación señales interruptores, tiempos muertos y amplificación (buffer).....	229
6.3.5. Convertidor NPC, <i>drivers</i> y bus de continua	230
6.3.6. Filtros y cargas	234
6.3.7. Sensores de tensión y corriente	236
6.3.8. Equipo completo	237
6.4. Conclusiones	238
Capítulo 7. Simulación y Verificación Experimental	241
7.1. Compendio de pruebas realizadas	242
7.2. Control de tensión con el sistema de baja potencia.....	245
7.2.1. Régimen permanente.....	245
7.2.2. Arranque.....	248
7.3. Control de tensión	250
7.3.1. Arranque.....	250

7.3.2. Cambio de consigna.....	254
7.3.3. Cambio de carga	256
7.3.4. Cambio en la tensión del bus de continua (v_{pn}).....	260
7.3.5. Observaciones sobre los resultados del control de tensión.....	263
7.4. Control de tensión y corriente.....	263
7.4.1. Activación del modo corriente.....	264
7.4.2. Desactivación del modo corriente.....	270
7.4.3. Observaciones sobre los resultados del control de corriente	275
7.5. Inversor NPC con carga no lineal	275
7.5.1. Arranque	276
7.5.2. Arranque con activación del modo corriente.....	281
7.5.3. Observaciones sobre los resultados obtenidos con carga no lineal.....	287
7.6. Convertidor NPC con conexión a red	288
7.6.1. Régimen permanente	289
7.6.2. Cambio en la tensión total del bus de continua.....	291
7.6.3. Observaciones sobre los resultados obtenidos en la conexión a red.....	293
7.7. Análisis de los contenidos armónicos	293
7.7.1. Inversor NPC con filtro LC y carga resistiva.....	293
7.7.2. Inversor NPC con filtro LC y carga no lineal	296
7.8. Conclusiones	299
Capítulo 8. Conclusiones y Futuras Líneas de Investigación	303
8.1. Conclusiones	303
8.2. Aportaciones de la tesis	305
8.3. Futuras líneas de investigación	307
Apéndice A. Promediado de variables	309
A.1. Operador de promediado.....	309
A.2. Aplicación sobre convertidores de alterna	310
Apéndice B. Transformación de Park o D-Q.....	311
B.1. Expresión de la matriz de transformación	311
B.2. Propiedades de la matriz de transformación.....	312
B.3. Propiedades del sistema trifásico y componentes homopolares.....	313
B.4. Aplicación genérica a un sistema en el espacio de estado.....	314
B.5. Transformación del inversor NPC con filtro LC y carga R.....	314
B.6. Valores de las tensiones y corrientes transformadas	322
Apéndice C. Consideraciones sobre la estrategia de conmutación para el convertidor NPC	325
C.1. Relaciones de conducción 'abc' con bus de continua desequilibrado	325

C.2. Tensión de salida y relaciones de conducción 'd' y 'q'	326
C.3. Valores límite para las relaciones de conducción d_{p0} y d_{n0}	330
Apéndice D. Cálculo del controlador en MatLab.....	339
D.1. Programa para el cálculo del controlador LQR.....	339
Apéndice E. Equipo experimental	341
E.1. Generación de las señales de los interruptores	341
E.2. Línea retardo y etapa amplificadora (<i>buffer</i>)	342
E.3. Rama del convertidor.....	343
E.4. Sensores	344
Referencias	345

Lista de figuras

Figura 2.1. Topologías de los convertidores multinivel.....	11
Figura 2.2. Convertidor trifásico <i>Diode-Clamped</i> de tres niveles o <i>Three-phase Neutral-Point-Clamped Converter</i>	11
Figura 2.3. Tensión de salida v_{ao} en función de los interruptores conectados para el convertidor <i>Diode-Clamped</i> de tres niveles.	12
Figura 2.4. Rama de un convertidor <i>Diode-Clamped</i> de cinco niveles.....	13
Figura 2.5. Tensión de salida v_{ao} en función de los interruptores conectados para el convertidor <i>Diode-Clamped</i> de cinco niveles.	14
Figura 2.6. Convertidor trifásico <i>Flying-Capacitor</i> de tres niveles.	16
Figura 2.7. Rama de un convertidor <i>Flying-Capacitor</i> de cinco niveles.	17
Figura 2.8. Rama de un convertidor <i>Cascaded Full-Bridge</i> de cinco niveles.....	19
Figura 2.9. Convertidor <i>Cascaded Full-Bridge</i> de tres niveles conectado en estrella.	20
Figura 2.10. Convertidor <i>Cascaded Full-Bridge</i> de cuatro niveles.	20
Figura 2.11. Convertidor de nueve niveles por asociación en cascada de dos convertidores <i>Flying-Capacitor</i> de dos ramas.....	22
Figura 2.12. Rectificador elevador de tres niveles.	23
Figura 2.13. Inversores acoplados por transformador.....	24
Figura 2.14. Rama del convertidor <i>Diode/Capacitor-Clamped</i> de tres niveles.	24
Figura 2.15. Rama del convertidor <i>New Diode-Clamped</i> de cinco niveles.	25
Figura 2.16. Rama de un convertidor generalizado de cuatro niveles.	26
Figura 2.17. Clasificación básica de los métodos de modulación multinivel.	27
Figura 2.18. Tensión de salida escalonada multinivel para una referencia senoidal.....	28
Figura 2.19. Tensión de salida escalonada generalizada con m ángulos de conmutación.	29
Figura 2.20. Tipo 1). Portadoras alternadas en contrafase para un inversor de cinco niveles. ...	31
Figura 2.21. Tipo 2). Portadoras con simetría respecto el eje horizontal para un inversor de cinco niveles.	31
Figura 2.22. Tipo 3). Todas las portadoras en fase para un inversor de cinco niveles.....	32
Figura 2.23. Modulación bipolar para un inversor de tres niveles.	33
Figura 2.24. PWM senoidal con tercer armónico añadido.....	33
Figura 2.25. PWM por muestro natural en un sistema digital.....	34
Figura 2.26. Diagrama de vectores de estado y vector de modulación para un inversor de tres niveles.	35
Figura 2.27. Equilibrado de las capacidades mediante la estrategia de conmutación.....	42

Figura 2.28. Equilibrado de las capacidades mediante el controlador.	43
Figura 3.1. Metodología de modelado.....	57
Figura 3.2. Inversor NPC con filtro LC y carga resistiva.....	58
Figura 3.3. Modelo de conmutación del inversor NPC con filtro LC y carga resistiva.	58
Figura 3.4. Detalle del lado de alterna.....	61
Figura 3.5. Detalle del lado de continua.....	62
Figura 3.6. Modelo de conmutación. Se considera i_{DC} como variable de entrada.....	71
Figura 3.7. Conexión del neutro de la carga con el punto medio del bus de continua.	74
Figura 3.8. Conexión 'N'-'o' a través de una inductancia L_N	81
Figura 3.9. Modelo de conmutación del convertidor NPC con carga resistiva.	83
Figura 3.10. Modelo de conmutación del convertidor NPC con carga R-L.	84
Figura 3.11. Modelo de conmutación del convertidor NPC con conexión a red.....	86
Figura 3.12. Conexión del neutro del sistema trifásico con el punto medio del bus de continua.	90
Figura 3.13. Conexión entre 'N' y 'o' a través de una inductancia L_N	94
Figura 3.14. Modelo de conmutación para la fase 'a' con un número impar de niveles.	96
Figura 3.15. Obtención del modelo completo del sistema en D-Q, para N niveles, N impar. ..	101
Figura 3.16. Modelo de conmutación para la fase 'a', referido al raíl negativo del bus de continua.	102
Figura 3.17. Obtención del modelo completo del sistema en D-Q, N niveles.	105
Figura 4.1. Esquema de bloques general para el control del convertidor.....	110
Figura 4.2. Inversor de dos niveles.....	111
Figura 4.3. Moduladoras (senoidales, 50 Hz) y portadora (triangular, 1 kHz) para la estrategia PWM senoidal, con $m_a = 0.8$ y $m_f = 20$	112
Figura 4.4. Moduladora (d_a), portadora (p), señales de conmutación de los interruptores de la rama correspondiente a la fase 'a' (S_{ap} , S_{an}), y relaciones de conducción (d_{ap} , d_{an}), para un inversor de dos niveles.	113
Figura 4.5. Relaciones de conducción para la fase 'a' a partir de las relaciones de conducción 'dq0' en régimen permanente.....	116
Figura 4.6. Modelo de conmutación de la topología NPC.	117
Figura 4.7. Relaciones de conducción d_{ap} , d_{an} a partir de la moduladora d_a , con $d_{ao} = 0.2$	118
Figura 4.8. Relaciones de conducción d_{ap} , d_{an} a partir de la moduladora d_a , con la relación de conducción d_{ao} variable (d_{ao} toma valores 0.1, 0.2 y 0.3).	119
Figura 4.9. Límites de las relaciones de conducción d_{p0} y d_{n0} para un caso arbitrario.	131
Figura 4.10. Límites de la suma ($d_{p0} + d_{n0}$), para los valores considerados en la figura 4.9.	131
Figura 4.11. Nuevos límites de las relaciones de conducción d_{p0} y d_{n0} , teniendo en cuenta ($d_{p0} +$ d_{n0}) _{max} , (d_{p0}) _{min} y (d_{n0}) _{min} , para un caso arbitrario.	132
Figura 4.12. Asignación de valores a las relaciones de conducción d_{p0} y d_{n0}	134
Figura 4.13. Relaciones de conducción d_{ap} , d_{bp} , d_{cp} y d_{an} , d_{bn} , d_{cn}	134
Figura 4.14. Relaciones de conducción d_{ao} , d_{bo} , d_{co}	135
Figura 4.15. Señales de entrada y salida del modulador PWM.....	136

Figura 4.16. Ubicación temporal de las funciones de conmutación.....	137
Figura 4.17. Obtención de las señales de conmutación correspondientes a la rama 'a' de la topología NPC (S1, S22, S11, S2) a partir de las funciones de conmutación S_{ap} y S_{an}	138
Figura 4.18. PWM asimétrica. Espectro armónico y distorsión armónica total.....	141
Figura 4.19. PWM simétrica. Espectro armónico y distorsión armónica total.	141
Figura 4.20. SVM-NTV. Espectro armónico y distorsión armónica total.	141
Figura 5.1. Esquema simple para el cálculo del controlador en el dominio D-Q.....	149
Figura 5.2. Diagrama de bloques del control LQR.	151
Figura 5.3. Configuración del servocontrolador lineal de estado.	154
Figura 5.4. Configuración del servocontrolador LQR con adición de parte integral.....	155
Figura 5.5. Controlador con programación de ganancia en función del punto de trabajo.	160
Figura 5.6. Diagrama de flujo de la metodología de diseño del controlador propuesto.....	163
Figura 5.7. Programación de ganancia para efectuar cuatro controles distintos.	170
Figura 5.8. Programación de ganancia en función del valor actual de los estados x_1 , x_2 y x_3 , basada en división en tramos o escalones de los márgenes de operación de los estados x_1 , x_2 y x_3	170
Figura 5.9. Limitador de rampa en la consigna y limitador de las señales de control.	171
Figura 5.10. Inversor NPC con filtro LC y carga resistiva.	173
Figura 5.11. Simulaciones para la asignación de los pesos relacionados con v_o (KP_{Vo} , KI_{Vo}) ..	180
Figura 5.12. Respuesta de la tensión de salida durante arranque en lazo abierto.....	181
Figura 5.13. Tensiones aplicadas a la carga, acciones de control y corrientes por las bobinas durante arranque en lazo cerrado con pesos $KP_{VVD} = 1e-5$, $KP_{VYQ} = 1e-5$	182
Figura 5.14. Respuesta del sistema durante arranque en lazo cerrado.....	184
Figura 5.15. Tensiones aplicadas a la carga, sin acción integral, siendo $V_{DC} = 280$ V.	185
Figura 5.16. Tensiones aplicadas a la carga, con acción integral ($KI_{VVD} = 1$, $KI_{VYQ} = 1$), siendo $V_{DC} = 280$ V.	185
Figura 5.17. Programación de ganancia para la regulación de la tensión aplicada a la carga...	186
Figura 5.18. Diagrama de flujo del control del convertidor, considerando protección contra sobrecorrientes.....	190
Figura 5.19. Conmutación de modo tensión a modo corriente (I).	194
Figura 5.20. Conmutación de modo tensión a modo corriente (II).	195
Figura 5.21. Conmutación de modo corriente a modo tensión (I).	196
Figura 5.22. Conmutación de modo corriente a modo tensión (II).	197
Figura 5.23. Sistema con carga rectificador.....	198
Figura 5.24. Diagrama de bloques genérico para un sistema fotovoltaico con conexión a red.	200
Figura 5.25. Modelo del sistema, empleando el modelo de conmutación del inversor NPC....	201
Figura 5.26. Diagrama de bloques general para simulación e implementación del sistema.	205
Figura 5.27. Cambio de punto de trabajo para el panel solar ($v_{pm} = 100$ V a 80 V).	208
Figura 5.28. Diferencia ($d_{ap} - d_{an}$) igual para distintos valores de las relaciones de conducción en el dominio D-Q.	211
Figura 6.1. Modelo promediado en D-Q para la simulación del convertidor.	217

Figura 6.2. Modelo matemático en coordenadas estacionarias 'abc'	218
Figura 6.3. Modelo de simulación con componentes de la librería "Power System Blockset" ..	219
Figura 6.4. Componente 'd' de la tensión de carga (v_{Yd}) y tensión de desequilibrio (v_o), simuladas con los tres modelos presentados.	222
Figura 6.5. Tensiones de carga (v_{aN} , v_{bN} , v_{cN}) y corrientes por las bobinas (i_a , i_b , i_c), simuladas con los tres modelos presentados.	223
Figura 6.6. Esquema de bloques correspondiente al equipo experimental.....	224
Figura 6.7. Pantalla de <i>ControlDesk</i>	226
Figura 6.8. Señales de conmutación para los interruptores de la rama correspondiente a la fase 'a', a partir de las funciones de conmutación S_{ap} y $\overline{S_{an}}$. PWM asimétrica.	228
Figura 6.9. Señales de conmutación para los interruptores de la rama correspondiente a la fase 'a', a partir de las funciones de conmutación S_{ap} y $\overline{S_{an}}$. PWM simétrica.	228
Figura 6.10. Señales de conmutación para los interruptores de la rama correspondiente a la fase 'a', a partir de las funciones de conmutación S_{ap} y $\overline{S_{an}}$. Sistema físico.....	228
Figura 6.11. Panel de conexiones.....	229
Figura 6.12. Adaptación de las señales entre el panel de conexiones y los <i>drivers</i> del convertidor NPC.....	230
Figura 6.13. Convertidor NPC.	231
Figura 6.14. Convertidor NPC. Vista frontal.	232
Figura 6.15. Convertidor NPC. Vista superior.	232
Figura 6.16. Rama del convertidor NPC (fase 'c'). Vista superior.	233
Figura 6.17. Filtro LC pasabajos.....	234
Figura 6.18. Carga resistiva variable por tramos.....	235
Figura 6.19. Rectificador trifásico y filtro LC (desconectados) montados sobre un radiador...	235
Figura 6.20. Sensores de efecto Hall LEM LV 25-P y LEM LA 25-NP.....	236
Figura 6.21. Convertidor NPC y otros elementos sobre la mesa de trabajo.....	237
Figura 6.22. Otra perspectiva de la mesa de trabajo.....	237
Figura 6.23. Panorámica del equipo experimental.	238
Figura 7.1. Convertidor NPC con filtro LC pasabajos y carga resistiva.	245
Figura 7.2. Medida experimental de las tensiones compuestas en bornes de la carga.	246
Figura 7.3. Medida experimental desde <i>ControlDesk</i> de la consigna de la tensión de carga. v_{Yd}^* y el valor actual v_{Yd} en lazo abierto.	248
Figura 7.4. Medida experimental desde <i>ControlDesk</i> de la consigna de la tensión de carga. v_{Yd}^* y su valor actual v_{Yd} en lazo cerrado.....	249
Figura 7.5. Medida experimental de las tensiones del bus de continua durante el arranque, con modulación PWM asimétrica. v_p y v_n	249
Figura 7.6. Simulación de las tensiones aplicadas a la carga v_{Yd} y v_{Yq} durante el arranque.....	250
Figura 7.7. Medida experimental de la componente 'd' de la tensión de carga desde <i>ControlDesk</i> . Consigna v_{Yd}^* y valor actual v_{Yd}	251

Figura 7.8. Medida experimental de la componente 'q' de la tensión de carga desde <i>ControlDesk</i> . Consigna v_{Yq}^* y valor actual v_{Yq}	251
Figura 7.9. Evolución de las tensiones simples aplicadas a las carga (v_{aN} , v_{bN} , v_{cN}).....	251
Figura 7.10. Evolución de las corrientes que circulan por las bobinas del filtro (i_a , i_b , i_c).....	252
Figura 7.11. Evolución de las tensiones del bus de continua (v_p , v_n).	252
Figura 7.12. Medida experimental de las tensiones del bus de continua desde <i>ControlDesk</i> . v_p y v_n	252
Figura 7.13. Evolución de la corriente del bus de continua (i_{DC}).....	253
Figura 7.14. Simulación de las relaciones de conducción 'abc' durante el arranque.	254
Figura 7.15. Medida experimental de las relaciones de conducción 'p' (d_{ap} , d_{bp} , d_{cp}) desde <i>ControlDesk</i>	254
Figura 7.16. Medida experimental de las relaciones de conducción 'n' (d_{an} , d_{bn} , d_{cn}) desde <i>ControlDesk</i>	254
Figura 7.17. Simulación de las tensiones aplicadas a la carga (v_{Yd} , v_{Yq}).	255
Figura 7.18. Medida experimental de la componente 'd' de la tensión de carga desde <i>ControlDesk</i> . Consigna v_{Yd}^* y valor actual v_{Yd}	255
Figura 7.19. Medida experimental de la componente 'q' de la tensión de carga desde <i>ControlDesk</i> . Consigna v_{Yq}^* y valor actual v_{Yq}	255
Figura 7.20. Evolución de las tensiones simples aplicadas a las carga (v_{aN} , v_{bN} , v_{cN}).....	256
Figura 7.21. Medida experimental de las corrientes de las bobinas (i_a , i_b , i_c) desde <i>ControlDesk</i>	256
Figura 7.22. Medida experimental de las tensiones del bus de continua desde <i>ControlDesk</i> . v_p y v_n	256
Figura 7.23. Medida experimental de las corrientes de las bobinas (i_a , i_b , i_c) desde <i>ControlDesk</i>	257
Figura 7.24. Simulación de las tensiones aplicadas a la carga (v_{Yd} , v_{Yq}) durante el cambio de carga.	257
Figura 7.25. Medida experimental de la componente 'd' de la tensión de carga desde <i>ControlDesk</i> . Consigna v_{Yd}^* y valor actual v_{Yd}	258
Figura 7.26. Medida experimental de la componente 'q' de la tensión de carga desde <i>ControlDesk</i> . Consigna v_{Yq}^* y valor actual v_{Yq}	258
Figura 7.27. Evolución de las tensiones simples aplicadas a las carga (v_{aN} , v_{bN} , v_{cN}).....	258
Figura 7.28. Evolución de las tensiones compuestas aplicadas a las carga ($v_{a'b'}$, $v_{b'c'}$, $v_{c'a'}$).	259
Figura 7.29. Medida experimental de las tensiones del bus de continua desde <i>ControlDesk</i> . v_p y v_n	259
Figura 7.30. Evolución de la corriente del bus de continua (i_{DC}).....	259
Figura 7.31. Medida experimental de las tensiones del bus de continua desde <i>ControlDesk</i> . v_p y v_n	260
Figura 7.32. Simulación de las tensiones aplicadas a la carga v_{Yd} y v_{Yq}	260
Figura 7.33. Medida experimental de la componente 'd' de la tensión de carga desde <i>ControlDesk</i> . Consigna v_{Yd}^* y valor actual v_{Yd}	261

Figura 7.34. Medida experimental de la componente 'q' de la tensión de carga desde <i>ControlDesk</i> . Consigna v_{Yq}^* y valor actual v_{Yq} .	261
Figura 7.35. Evolución de las tensiones simples aplicadas a las carga ($v_{a'N}$, $v_{b'N}$, $v_{c'N}$).	261
Figura 7.36. Medida experimental de las corrientes de las bobinas (i_a , i_b , i_c) desde <i>ControlDesk</i> .	262
Figura 7.37. Simulación de las relaciones de conducción 'abc'.	262
Figura 7.38. Medida experimental de las relaciones de conducción 'p' (d_{ap} , d_{bp} , d_{cp}) desde <i>ControlDesk</i> .	262
Figura 7.39. Medida experimental de las relaciones de conducción 'n' (d_{an} , d_{bn} , d_{cn}) desde <i>ControlDesk</i> .	262
Figura 7.40. Simulación de la activación del modo corriente.	265
Figura 7.41. Medida experimental del módulo de la corriente y del indicador del modo de control desde <i>ControlDesk</i> .	265
Figura 7.42. Simulación de las corrientes de las bobinas i_{Yd} e i_{Yq} .	266
Figura 7.43. Medida experimental de la componente 'd' de la corriente de las bobinas de filtro desde <i>ControlDesk</i> . Consigna i_{Yd}^* y valor actual i_{Yd} .	266
Figura 7.44. Medida experimental de la componente 'q' de la tensión de carga desde <i>ControlDesk</i> . Consigna i_{Yq}^* y valor actual i_{Yq} .	266
Figura 7.45. Simulación de las tensiones aplicadas a la carga v_{Yd} y v_{Yq} .	267
Figura 7.46. Medida experimental de la componente 'd' de la tensión de carga desde <i>ControlDesk</i> . Consigna v_{Yd}^* y valor actual v_{Yd} .	267
Figura 7.47. Medida experimental de la componente 'q' de la tensión de carga desde <i>ControlDesk</i> . Consigna v_{Yq}^* y valor actual v_{Yq} .	267
Figura 7.48. Evolución de las tensiones simples aplicadas a la carga ($v_{a'N}$, $v_{b'N}$, $v_{c'N}$).	268
Figura 7.49. Simulación de las tensiones del bus de continua y las corrientes de las bobinas.	269
Figura 7.50. Medida experimental de las tensiones del bus de continua desde <i>ControlDesk</i> . v_p y v_n .	269
Figura 7.51. Medida experimental de las corrientes de las bobinas (i_a , i_b , i_c) desde <i>ControlDesk</i> .	269
Figura 7.52. Simulación de las relaciones de conducción 'abc'.	270
Figura 7.53. Medida experimental de las relaciones de conducción 'p' (d_{ap} , d_{bp} , d_{cp}) desde <i>ControlDesk</i> .	270
Figura 7.54. Medida experimental de las relaciones de conducción 'n' (d_{an} , d_{bn} , d_{cn}) desde <i>ControlDesk</i> .	270
Figura 7.55. Simulación de la desactivación del modo corriente.	271
Figura 7.56. Medida experimental del módulo de la corriente y del indicador del modo de control desde <i>ControlDesk</i> .	272
Figura 7.57. Simulación de las tensiones aplicadas a la carga v_{Yd} y v_{Yq} .	272
Figura 7.58. Medida experimental de la componente 'd' de la tensión de carga desde <i>ControlDesk</i> . Consigna v_{Yd}^* y valor actual v_{Yd} .	272

Figura 7.59. Medida experimental de la componente 'q' de la tensión de carga desde <i>ControlDesk</i> . Consigna v_{Yq}^* y valor actual v_{Yq} .	273
Figura 7.60. Evolución de las tensiones simples aplicadas a la carga ($v_{a'N}$, $v_{b'N}$, $v_{c'N}$).	273
Figura 7.61. Medida experimental de las corrientes de las bobinas (i_a , i_b , i_c) desde <i>ControlDesk</i> .	273
Figura 7.62. Medida experimental de las tensiones del bus de continua desde <i>ControlDesk</i> . v_p y v_n .	274
Figura 7.63. Simulación de las relaciones de conducción 'abc'.	274
Figura 7.64. Medida experimental de las relaciones de conducción 'p' (d_{ap} , d_{bp} , d_{cp}) desde <i>ControlDesk</i> .	274
Figura 7.65. Medida experimental de las relaciones de conducción 'n' (d_{an} , d_{bn} , d_{cn}) desde <i>ControlDesk</i> .	274
Figura 7.66. Inversor NPC alimentando a un puente rectificador trifásico.	275
Figura 7.67. Simulación de las tensiones aplicadas a la carga (v_{Yd} , v_{Yq}).	277
Figura 7.68. Medida experimental de la componente 'd' de la tensión de carga desde <i>ControlDesk</i> . Consigna v_{Yd}^* y valor actual v_{Yd} .	277
Figura 7.69. Medida experimental de la componente 'q' de la tensión de carga desde <i>ControlDesk</i> . Consigna v_{Yq}^* y valor actual v_{Yq} .	277
Figura 7.70. Evolución de las tensiones simples aplicadas a las carga ($v_{a'N}$, $v_{b'N}$, $v_{c'N}$).	278
Figura 7.71. Tensiones compuestas en la entrada del rectificador ($v_{a'b'}$, $v_{b'c'}$, $v_{c'a'}$) y tensión de carga en el rectificador (v_{DC}).	278
Figura 7.72. Corrientes a través de las bobinas del filtro de alterna (i_a , i_b , i_c) y corriente a través de la bobina de filtro de continua (i_{LRECT}).	279
Figura 7.73. Tensiones del bus de continua (v_p , v_n).	280
Figura 7.74. Simulación de las relaciones de conducción 'abc' durante el arranque.	280
Figura 7.75. Simulación de las relaciones de conducción 'o' (d_{ao} , d_{bo} , d_{co}).	280
Figura 7.76. Relaciones de conducción 'p' (d_{ap} , d_{bp} , d_{cp}) desde <i>ControlDesk</i> .	281
Figura 7.77. Relaciones de conducción 'n' (d_{an} , d_{bn} , d_{cn}) desde <i>ControlDesk</i> .	281
Figura 7.78. Tensión de salida del rectificador (v_{DC}) y corriente a través de la bobina del rectificador (i_{LRECT}).	282
Figura 7.79. Corrientes absorbidas por el rectificador (i_a , i_b , i_c).	282
Figura 7.80. Corrientes a través de las bobinas del filtro de alterna (i_a , i_b , i_c).	283
Figura 7.81. Medida experimental de las corrientes de las bobinas (i_a , i_b , i_c) desde <i>ControlDesk</i> .	283
Figura 7.82. Simulación de la conmutación entre modos de control del controlador.	283
Figura 7.83. Medida experimental del módulo de la corriente y del indicador del modo de control desde <i>ControlDesk</i> .	284
Figura 7.84. Simulación de las tensiones aplicadas a la carga (v_{Yd} , v_{Yq}).	284
Figura 7.85. Evolución de la tensión alterna de carga en el dominio D-Q desde <i>ControlDesk</i> .	285
Figura 7.86. Tensiones simples en la entrada del rectificador ($v_{a'N}$, $v_{b'N}$, $v_{c'N}$).	285
Figura 7.87. Tensiones compuestas en la entrada del rectificador ($v_{a'b'}$, $v_{b'c'}$, $v_{c'a'}$).	286

Figura 7.88. Tensiones del bus de continua (v_p, v_n).....	286
Figura 7.89. Simulación de las relaciones de conducción 'abc' durante el arranque.	286
Figura 7.90. Relaciones de conducción 'p' (d_{ap}, d_{bp}, d_{cp}) desde <i>ControlDesk</i>	287
Figura 7.91. Relaciones de conducción 'n' (d_{an}, d_{bn}, d_{cn}) desde <i>ControlDesk</i>	287
Figura 7.92. Convertidor NPC con conexión a red.	288
Figura 7.93. Tensiones simples de red.	289
Figura 7.94. Corrientes entregadas a la red trifásica (i_a, i_b, i_c).....	289
Figura 7.95. Simulación de las corrientes entregadas a la red trifásica (i_a, i_b, i_c), considerando tensiones de red equilibradas.....	290
Figura 7.96. Tensión simple (v_{sa}) y corriente (i_a) de la fase 'a'.	290
Figura 7.97. Rendimiento del sistema en función de la potencia de entrada.....	291
Figura 7.98. Evolución de las tensiones del bus de continua (v_p, v_n).	292
Figura 7.99. Evolución de la tensión simple (v_{sa}) y la corriente (i_a) de la fase 'a'.	292
Figura 7.100. Tensión compuesta de salida del convertidor NPC (v_{ab}). Consigna 41 V.....	294
Figura 7.101. Tensión compuesta de salida del convertidor NPC (v_{ab}). Consigna 63 V.....	294
Figura 7.102. Tensión compuesta de salida del convertidor NPC (v_{ab}). Consigna 120 V.....	295
Figura 7.103. Tensiones compuestas en bornes de la carga ($v_{a'b'} - v_{b'c'} - v_{c'a'}$). Consigna 120 V.....	295
Figura 7.104. Tensiones simples en bornes de la carga ($v_{a'N} - v_{b'N} - v_{c'N}$). Consigna 120 V.....	296
Figura 7.105. Corrientes absorbidas por el rectificador ($i_{a'} - i_{b'} - i_{c'}$) y corriente a través de la bobina del rectificador.....	296
Figura 7.106. Espectro armónico y datos adicionales de la corriente del rectificador $i_{a'}$	297
Figura 7.107. Corrientes de las bobinas del filtro ($i_a - i_b - i_c$) y corriente a través de la bobina del rectificador.	297
Figura 7.108. Tensiones compuestas aplicadas a la carga ($v_{a'b'} - v_{b'c'} - v_{c'a'}$) y tensión de carga del rectificador para un valor de consigna 80 V.....	298
Figura 7.109. Tensiones simples aplicadas a la carga ($v_{a'N} - v_{b'N} - v_{c'N}$) y tensión de carga del rectificador para un valor de consigna 80 V.....	298
Figura 7.110. Espectro armónico y datos adicionales de la tensión $v_{a'N}$	299
Figura B.1. Sistemas de referencia trifásico y D-Q.....	312
Figura C.1. Diagrama fasorial con la referencia D-Q alineada con el fasor de tensión.....	328
Figura C.2. Fasor de tensión y referencia D-Q, caso general.....	329
Figura C.3. Límites del fasor.....	330
Figura C.4. Límites de d_{p0} para verificar la condición $0 \leq d_{ap} \leq 1$	332
Figura C.5. Límites para d_{p0} y d_{n0} con estrategia de conmutación simétrica.....	332
Figura C.6. Rango válido para d_{p0} tal que se verifica $0 \leq d_{ap} \leq 1, 0 \leq d_{ao} \leq 1, 0 \leq d_{an} \leq 1$	333
Figura C.7. Análisis detallado del margen para d_{p0}	334
Figura C.8. Margen para D_0	335
Figura C.9. Margen para $(d_{p0} + d_{n0})$ impuesto por la limitación 2 en la fase 'a'.	336
Figura C.10. Rango válido para $(d_{p0} + d_{n0})$ tal que se verifica la limitación 2.	337
Figura E.1. Puertas inversoras para obtener las señales S11, S2, S33, S4, S55 y S6.	341
Figura E.2. Líneas de retardo y amplificadores para las doce señales de conmutación.	342

Figura E.3. Rama del convertidor.....	343
Figura E.4. Placa de sensores.....	344

Lista de tablas

Tabla 2.1. Interruptores a conmutar para obtener los tres niveles de tensión de salida en el convertidor <i>Diode-Clamped</i>	12
Tabla 2.2. Interruptores a conmutar para obtener los cinco niveles de tensión de salida en el convertidor <i>Diode-Clamped</i>	13
Tabla 2.3. Interruptores a conmutar para obtener los tres niveles de tensión de salida en el convertidor <i>Flying-Capacitor</i>	16
Tabla 2.4. Interruptores a conmutar para obtener los cinco niveles de tensión de salida en el convertidor <i>Flying-Capacitor</i>	17
Tabla 2.5. Comparación de características de las topologías multinivel básicas, con n niveles.	27
Tabla 4.1. Tabla de verdad para la rama 'a' del convertidor NPC.....	137
Tabla 4.2. Tabla de verdad para la rama 'b' del convertidor NPC.....	137
Tabla 4.3. Tabla de verdad para la rama 'c' del convertidor NPC.....	138
Tabla 4.4. Ganancia máxima de las diferentes estrategias de conmutación.....	139
Tabla 4.5. Número total de conmutaciones en el convertidor por periodo de conmutación.....	140
Tabla 6.1. Duración de una simulación de 20 ms para el arranque del convertidor en lazo abierto en función del modelo de simulación empleado y del procesador.....	220
Tabla 6.2. Algunas prestaciones de los equipos dSPACE 1102 y 1104.....	225
Tabla 6.3. Señales de conmutación a partir de las funciones de conmutación.....	227
Tabla 7.1. Resultados experimentales para el inversor NPC a bajo nivel con filtro LC y carga resistiva.....	243
Tabla 7.2. Resultados experimentales para el inversor NPC con filtro LC y carga resistiva....	243
Tabla 7.3. Resultados experimentales para el convertidor NPC con carga no lineal.....	244
Tabla 7.4. Resultados experimentales para el convertidor NPC con conexión a red.....	244
Tabla 7.5. Error estacionario en lazo abierto y lazo cerrado.....	247
Tabla 7.6. Coeficiente de regulación de carga en lazo abierto y lazo cerrado.....	247
Tabla 7.7. Coeficiente de regulación de línea en lazo abierto y lazo cerrado.....	248
Tabla 7.8. Distorsión armónica para la tensión compuesta de salida (v_{ab}) del convertidor NPC.....	295

Glosario de acrónimos y abreviaturas

abc	Sistema de referencia estacionario cartesiano
CF	Factor de cresta (<i>Crest Factor</i>)
CRC	Coefficiente de regulación de carga
CRL	Coefficiente de regulación de línea
DQ ó D-Q	Sistema de referencia rotativo de Park
DSP	Procesador digital de señal (<i>Digital Signal Processor</i>)
EMI	Interferencias electromagnéticas (<i>ElectroMagnetic Interferences</i>)
ES	Error estacionario
FACTS	Sistemas flexibles de transmisión en alterna (<i>Flexible AC Transmission Systems</i>)
GTO	Tiristor bloqueable por la puerta (<i>Gate Turn-Off thyristor</i>)
HVDC	Transmisión en continua de alta tensión (<i>High Voltage Direct Current</i>)
IGBT	Transistor bipolar de puerta aislada (<i>Insulated Gate Bipolar Transistor</i>)
IGCT	Tiristor controlado por puerta aislada (<i>Insulated Gate Controlled Thyristor</i>)
LQR	Regulador lineal cuadrático (<i>Linear Quadratic Regulator</i>)
MIMO	Sistema de múltiples entradas y salidas (<i>Multiple-Input Multiple-Output</i>)
MPPT	Seguimiento del punto de máxima potencia en sistemas fotovoltaicos (<i>Maximum Power Point Tracking</i>)
NPC	Convertidor de tres niveles con diodos de fijación (<i>Neutral-Point-Clamped Converter</i>)
PSB	Librería de MatLab-Simulink con componentes de potencia (<i>Power System Blockset</i>)
PWM	Modulación del ancho de pulso (<i>Pulse Width Modulation</i>)
SISO	Sistema de una entrada y una salida (<i>Single-Input Single-Output</i>)
SMES	Sistema de almacenamiento de energía en bobina superconductora (<i>Superconducting Magnetic Energy Storage</i>)
STATCOM	Compensación estático-síncrona (<i>Static-Synchronous Compensation</i>)
SVC	Compensación estática de potencia reactiva (<i>Static Var Compensation</i>)
SVG	Generador estático de potencia reactiva (<i>Static Var Generator</i>)
SVM	Modulación por vectores espaciales (<i>Space Vector Modulation</i>)
THD	Distorsión armónica total (<i>Total Harmonic Distortion</i>)
UPFC	Controlador unificado del flujo de potencia (<i>Unified Power Flow Controller</i>)

Glosario de símbolos y términos

$[A]$	Matriz de la representación de un sistema en el espacio de estado
$[B]$	Matriz de la representación de un sistema en el espacio de estado
$[C]$	Matriz de la representación de un sistema en el espacio de estado
C	Capacidad del filtro en el lado de alterna
C_{DC}	Capacidad del bus de continua
C_{RECT}	Capacidad del filtro de salida de un rectificador
$[D]$	Matriz de la representación de un sistema en el espacio de estado
$[d]$	Matriz de las relaciones de conducción en el dominio 'abc'
$[d_r]$	Matriz de las relaciones de conducción en el dominio D-Q
d_{nd}	Relación de conducción 'n' sobre el eje 'd'
d_{nq}	Relación de conducción 'n' sobre el eje 'q'
d_{n0}	Relación de conducción 'n' a secuencia cero
d_{pd}	Relación de conducción 'p' sobre el eje 'd'
d_{pq}	Relación de conducción 'p' sobre el eje 'q'
d_{p0}	Relación de conducción 'p' a secuencia cero
D_d	Relación de conducción sobre el eje 'd' para estrategia de conmutación simétrica
D_q	Relación de conducción sobre el eje 'q' para estrategia de conmutación simétrica
D_0	Relación de conducción a secuencia cero para estrategia de conmutación simétrica
d_a	Señal moduladora para la fase 'a'
d_b	Señal moduladora para la fase 'b'
d_c	Señal moduladora para la fase 'c'
$(d_{ij})_s$	Componente senoidal de la relación de conducción d_{ij} en el dominio 'abc'
$(d_{ij})_d$	Componente continua de la relación de conducción d_{ij} en el dominio 'abc'
f	Frecuencia de la tensión de salida
f_s	Frecuencia de conmutación
i_{DC}	Corriente entregada por la fuente al bus de continua
i_p	Corriente del raíl 'p'
i_n	Corriente del raíl 'n'
i_o	Corriente del raíl 'o'
$[i_Y]$	Vector de corrientes trifásicas de salida del convertidor NPC $\{i_a, i_b, i_c\}$
$[i_{Yr}]$	Vector de corrientes de salida del convertidor NPC en el dominio D-Q $\{i_{Yd}, i_{Yq}, i_{Y0}\}$

i_{Yd}	Corriente de salida del convertidor NPC sobre el eje 'd'
i_{Yq}	Corriente de salida del convertidor NPC sobre el eje 'q'
i_{Y0}	Corriente de salida del convertidor NPC a secuencia cero
i_{No}	Corriente entre el neutro de la carga y el punto medio del bus de continua
$[I]$	Matriz identidad
I_{x_i}	Estado correspondiente a la integral del estado x_i
$I_{límite}$	Valor de corriente por encima del cual se considera sobrecorriente
J	Función de coste del controlador LQR
J_x	Parte de la función de coste asociada a los estados
J_u	Parte de la función de coste asociada a las entradas
$[K]$	Matriz de control LQR
$[K_P]$	Matriz de control proporcional LQR
$[K_I]$	Matriz de control integral LQR
KP_x	Peso proporcional asignado a la variable x en la función de coste J
KI_x	Peso integral asignado a la variable x en la función de coste J
L	Inductancia del filtro en el lado de alterna
L_N	Inductancia entre el neutro de la carga y el punto medio del bus de continua
L_{RECT}	Inductancia del filtro de salida de un rectificador
m_a	Índice de amplitud
m_f	Índice de frecuencia
P	Potencia
$[Q]$	Matriz de pesos de los estados en el controlador LQR
$[R]$	Matriz de pesos de las entradas en el controlador LQR
R	Resistencia por fase
R_{DC}	Resistencia de carga de un rectificador
R_{AC}	Resistencia por fase en alterna equivalente a R_{DC}
S_{ij}	Función de conmutación de la fase 'i' con el raíl 'j'
$[T]$	Matriz de la transformación D-Q ó de Park
T_m	Periodo de muestreo
T_s	Periodo de conmutación
$[u]$	Vector de entradas o variables de control de un sistema
v_p	Tensión entre el raíl 'p' y el raíl 'o' en el convertidor NPC
v_n	Tensión entre el raíl 'n' y el raíl 'o' en el convertidor NPC
v_{pn}	Tensión total del bus de continua
v_o	Tensión de desequilibrio del bus de continua
v_{No}	Tensión entre el neutro de la carga 'N' y el punto medio del bus de continua 'o'
$[v]$	Vector de tensiones trifásicas de salida del convertidor NPC, referidas al punto medio del bus de continua 'o' $\{v_{ao}, v_{bo}, v_{co}\}$
$[v_r]$	Vector de tensiones de salida del convertidor NPC, referidas al punto medio del bus de continua 'o', en el dominio D-Q $\{v_{VSI d}, v_{VSI q}, v_{VSI 0}\}$

$[v_Y]$	Vector de tensiones trifásicas de carga, referidas al punto medio del bus de continua 'o' $\{v_{a'o}, v_{b'o}, v_{c'o}\}$
$[v_{Yr}]$	Vector de tensiones de carga, referidas al punto medio del bus de continua 'o', en el dominio D-Q $\{v_{Yd}, v_{Yq}, v_{Y0}\}$
$[v_{YN}]$	Vector de tensiones trifásicas de carga, referidas al neutro de la carga 'N' $\{v_{a'N}, v_{b'N}, v_{c'N}\}$
$[v_{YNr}]$	Vector de tensiones de carga, referidas al neutro de la carga 'N', en el dominio D-Q $\{v_{YNd}, v_{YNq}, v_{YN0}\}$
$[v_s]$	Vector de tensiones trifásicas simples de red, referidas al neutro de la red 'N'
$[v_{sr}]$	Vector de tensiones simples de red, referidas al neutro de la red 'N', en el dominio D-Q $\{v_{sd}, v_{sq}, v_{s0}\}$
$v_{VSI d}$	Tensión de salida del convertidor NPC referida a 'o', sobre el eje 'd'
$v_{VSI q}$	Tensión de salida del convertidor NPC referida a 'o', sobre el eje 'q'
$v_{VSI 0}$	Tensión de salida del convertidor NPC referida a 'o', a secuencia cero
v_{Yd}	Tensión de carga referida a 'o', sobre el eje 'd'
v_{Yq}	Tensión de carga referida a 'o', sobre el eje 'q'
v_{Y0}	Tensión de carga referida a 'o', a secuencia cero
v_{YNd}	Tensión de carga referida a 'N', sobre el eje 'd'
v_{YNq}	Tensión de carga referida a 'N', sobre el eje 'q'
v_{YN0}	Tensión de carga referida a 'N', a secuencia cero
v_{sd}	Tensión simple de red referida a 'N', sobre el eje 'd'
v_{sq}	Tensión simple de red referida a 'N', sobre el eje 'q'
v_{s0}	Tensión simple de red referida a 'N', a secuencia cero
W	Peso relativo asignado a la parte de la función de coste J_u
x	Expresión de gran señal de una variable
X	Expresión de régimen permanente de una variable
\hat{x}	Expresión de pequeña señal de una variable
x^*	Consigna de la variable x
x^{PT}	Punto de trabajo de la variable x
$[x]$	Vector de estado de un sistema
$[y]$	Vector de salidas de un sistema
φ	Ángulo inicial de la tensión de salida
θ	Ángulo de la referencia rotativa D-Q
θ_o	Ángulo inicial de la referencia rotativa D-Q
ω	Pulsación de la tensión de salida y velocidad angular de la referencia D-Q

