



UNIVERSITAT POLITECNICA DE CATALUNYA

DEPARTAMENT D'ENGINYERIA ELECTRONICA

***“INVERSORES BIDIRECCIONALES CON AISLAMIENTO EN ALTA
FRECUENCIA PARA APLICACIONES DE ENERGÍAS RENOVABLES”***

Tesi doctoral presentada per a
l'obtenció del títol de doctor

José Antonio Beristáin Jiménez

Director: *Josep Bordonau Farrerons*

Juny de 2005

A mis padres Lino y Ma. Felipa
A mi esposa Silvia Lucía y a mi hijo José Antonio

Agradecimientos

Quiero agradecer a mi director y tutor de tesis, Josep Bordonau Farrerons, el tiempo que ha dedicado para dirigir este trabajo de investigación. Gracias por volcar su experiencia y sus conocimientos en la dirección de esta tesis.

A los doctores Joan Peracaula, Juan Manuel Moreno y Rafael Lamaison les agradezco su interés por el trabajo de tesis y por sus muestras de apoyo durante mi estancia en el grupo de electrónica de potencia.

A los doctores Jaime Arau y Abraham Claudio les agradezco el tiempo invertido en mi formación y la confianza depositada en mi al recomendar mi ingreso a esta Universidad.

Muy especialmente agradezco a mis compañeros Doctorandos: Salvador Alepuz, Joan Salaet, Montserrat Mata, Alex Gilabert, Joan Rocabert y Sergi Busquets, por recibirme y facilitarme la integración en su grupo de trabajo. Asimismo considero de gran valor sus consejos y sus aportaciones al desarrollo de este trabajo. A los becarios Elena Argüelles, Javier Artacho, Oriol Raventós y Marc Sánchez por su contribución a la realización de los convertidores.

Agradezco al Instituto Tecnológico de Sonora, *ITSON* y al Programa de Mejoramiento del Profesorado, *PROMEPE*, por su apoyo económico sin el cual hubiese sido imposible la realización de estos estudios doctorales. Mi especial reconocimiento al maestro José Manuel Campoy y al maestro Adolfo Espinoza, por la gestión realizada.

A mis compañeros docentes del departamento de ingeniería eléctrica y electrónica del *itson*, agradezco su amistad y las muestras de apoyo que he recibido desde que ingresé a la institución.

A mis compañeros de la generación de maestría del *cenidet* agradezco sus muestras de apoyo y muy en especial a Pedro Sibaja por la gestión realizada para la convalidación de créditos de maestría.

A Don Santiago y Doña Lourdes, gracias por todo el apoyo recibido durante nuestra estancia en Barcelona.

A Silvia deseo agradecer su cariño, su comprensión y su apoyo en todo momento.

A mi hijo José Antonio, quiero que sepas que tu presencia ilumina mi camino y me da fuerzas para continuar adelante.

A mis hermanos: Roberto, Gabriela y David, quiero agradecerles su ejemplo que como personas y profesionales han sabido darme.

A mis padres, Lino y Felipa, gracias por el esfuerzo realizado para darnos la formación que ahora tenemos.

ÍNDICE DE LA TESIS

Índice	I
Glosario de acrónimos y abreviaturas	IX
Glosario de símbolos y términos	XI
1. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1. UBICACIÓN DEL ÁMBITO DE ESTUDIO DEL TRABAJO DE INVESTIGACIÓN	2
1.2. SISTEMAS DE CONVERSIÓN CC/CA QUE REQUIEREN AISLAMIENTO ELÉCTRICO	3
1.2.1. Sistemas de alimentación fotovoltaicos	3
1.2.1.1. <i>Sistemas fotovoltaicos autónomos</i>	3
1.2.1.2. <i>Sistemas fotovoltaicos conectados a red</i>	4
1.2.2. Sistemas de celdas de combustible	5
1.2.3. Sistemas de alimentación ininterrumpida	6
1.2.4. Compensación armónica	6
1.3. VENTAJAS DE LOS INVERSORES CON FLUJO DE POTENCIA BIDIRECCIONAL	6
1.4. CLASIFICACIÓN DE LOS INVERSORES BIDIRECCIONALES CON AISLAMIENTO ELÉCTRICO SIN FILTRO INTERMEDIO EN CORRIENTE CONTINUA	7
1.4.1. Inversores de tipo directo	7
1.4.2. Inversores de tipo indirecto	8
1.5. LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN ACTUALES	8
1.6. VENTAJAS DE UNA NUEVA LÍNEA DE INVESTIGACIÓN EN INVERSORES BIDIRECCIONALES MULTINIVEL CON AISLAMIENTO EN ALTA FRECUENCIA	8
1.7. PLANTEAMIENTO Y RESUMEN DE LA TESIS	9
1.8. OBJETIVOS	11
1.9. CONCLUSIONES	11

2. METODOLOGÍA PARA EL ANÁLISIS Y SÍNTESIS DE INVERSORES BIDIRECCIONALES CON AISLAMIENTO EN ALTA FRECUENCIA DE TIPO DIRECTO	13
2.1. REPRESENTACIÓN GENERALIZADA DE LOS INVERSORES BIDIRECCIONALES CON AISLAMIENTO EN ALTA FRECUENCIA DE TIPO DIRECTO	15
2.1.1. Tipos de fuentes de corriente continua	16
2.1.2. Tipos de convertidores cc/ca de alta frecuencia	16
2.1.2.1. Descripción del convertidor cc/ca de alta frecuencia medio puente	17
2.1.2.2. Descripción del convertidor cc/ca de alta frecuencia puente completo	17
2.1.2.3. Descripción del convertidor cc/ca de alta frecuencia push-pull	18
2.1.3. Descripción del transformador de alta frecuencia	18
2.1.4. Descripción del convertidor ca/ca	19
2.1.4.1. Convertidor ca/ca medio puente con toma media	19
2.1.4.2. Convertidor ca/ca en configuración puente completo	20
2.1.4.3. Síntesis de convertidores ca/ca multinivel	20
2.1.5. Filtro de salida pasabajos	21
2.1.6. Carga en corriente alterna	21
2.2. INVERSORES BIDIRECCIONALES CON AISLAMIENTO EN ALTA FRECUENCIA TIPO DIRECTO	21
2.2.1. Inversor con entrada medio puente y salida puente completo	21
2.2.2. Inversor con entrada puente completo y salida medio puente o puente completo	22
2.2.3. Inversor con entrada <i>push-pull</i> y salida puente completo	23
2.2.4. Síntesis del inversor bidireccional multinivel con aislamiento en alta frecuencia basado en las topologías puente completo/medio puente	24
2.2.5. Síntesis del inversor bidireccional multinivel con aislamiento en alta frecuencia basado en las topologías <i>push-pull</i> /puente completo	24
2.3. ESTRATEGIAS DE MODULACIÓN	25
2.3.1. Estrategia de modulación PWM	25
2.3.2. Estrategia de modulación en vectores de estado	26
2.3.2.1. Modulación para inversores de dos niveles	26
2.3.2.2. Modulación para inversores multinivel	27
2.4. ESTRATEGIA DE CONMUTACIÓN	28

2.5. MODELADO DE INVERSORES CON AISLAMIENTO EN ALTA FRECUENCIA	29
2.6. ELECCIÓN DEL SISTEMA DE CONTROL	30
2.7. ELECCIÓN DEL ENTORNO DE SIMULACIÓN	31
2.8. CONCLUSIONES	31
3. INVERSORES BIDIRECCIONALES DE DOS NIVELES CON AISLAMIENTO EN ALTA FRECUENCIA	35
3.1. INTRODUCCIÓN	37
3.2. DESCRIPCIÓN DEL INVERSOR BIDIRECCIONAL DE DOS NIVELES CON AISLAMIENTO EN ALTA FRECUENCIA UTILIZANDO LAS TOPOLOGÍAS PUENTE COMPLETO/PUENTE COMPLETO	37
3.3. DESCRIPCIÓN DEL INVERSOR BIDIRECCIONAL DE DOS NIVELES CON AISLAMIENTO EN ALTA FRECUENCIA UTILIZANDO LAS TOPOLOGÍAS PUENTE COMPLETO/MEDIO PUENTE	38
3.4. DESCRIPCIÓN DEL INVERSOR BIDIRECCIONAL DE DOS NIVELES CON AISLAMIENTO EN ALTA FRECUENCIA UTILIZANDO LAS TOPOLOGÍAS <i>PUSH-PULL</i> /PUENTE COMPLETO	39
3.5. DESCRIPCIÓN DEL INVERSOR BIDIRECCIONAL DE DOS NIVELES CON AISLAMIENTO EN ALTA FRECUENCIA UTILIZANDO LA TOPOLOGÍA <i>PUSH-PULL</i> /MEDIO PUENTE	40
3.6. PROPUESTA DE ESTRATEGIA DE MODULACIÓN PARA INVERSORES BIDIRECCIONALES DE DOS NIVELES CON AISLAMIENTO EN ALTA FRECUENCIA	40
3.7. PROPUESTA DE ESTRATEGIA DE CONMUTACIÓN PARA INVERSORES BIDIRECCIONALES DE DOS NIVELES CON AISLAMIENTO EN ALTA FRECUENCIA	42
3.7.1. Estrategia de conmutación para el convertidor cc/ca puente completo	42
3.7.2. Estrategia de conmutación para el convertidor cc/ca <i>push-pull</i>	44
3.7.3. Estrategia de conmutación para el convertidor ca/ca puente completo	44
3.7.4. Estrategia de conmutación para el convertidor ca/ca medio puente	48
3.8. MODELADO PARA INVERSORES BIDIRECCIONALES DE DOS NIVELES	50
3.8.1. Modelado para el inversor bidireccional de dos niveles basado en las topologías puente completo/puente completo	50

3.8.2.	Modelado para el inversor bidireccional de dos niveles basado en las topologías puente completo/medio puente	51
3.8.3.	Modelado para el inversor bidireccional de dos niveles basado en las topologías <i>push-pull</i> /puente completo	53
3.8.4.	Promediado de las ecuaciones de estado	54
3.8.5.	Transformación a coordenadas DQ	55
3.8.6.	Linealización de la ecuación de espacio de estado promediada	56
3.9.	PROPUESTA DE CONTROL PARA INVERSORES BIDIRECCIONALES DE DOS NIVELES CON AISLAMIENTO EN ALTA FRECUENCIA	58
3.10.	CONCLUSIONES	59
4.	PROPUESTA DEL INVERSOR BIDIRECCIONAL CON AISLAMIENTO EN ALTA FRECUENCIA MULTINIVEL UTILIZANDO LAS TOPOLOGÍAS PUENTE COMPLETO/MEDIO PUENTE	63
4.1.	DESCRIPCIÓN DEL INVERSOR BIDIRECCIONAL MULTINIVEL CON AISLAMIENTO EN ALTA FRECUENCIA BASADO EN LAS TOPOLOGÍAS PUENTE COMPLETO/MEDIO PUENTE	65
4.2.	DESCRIPCIÓN EN VECTORES DE ESTADO DE TENSIÓN V_{EF} DEL INVERSOR BIDIRECCIONAL MULTINIVEL CON AISLAMIENTO EN ALTA FRECUENCIA PUENTE COMPLETO/MEDIO PUENTE	66
4.3.	PROPUESTA DE ESTRATEGIA DE MODULACIÓN EN VECTORES DE ESTADO DE TENSIÓN V_{EF}	71
4.3.1.	Estrategia de modulación unipolar multinivel	71
4.3.2.	Estrategia de modulación de los dos vectores más cercanos	75
4.4.	PROPUESTA DE ESTRATEGIA DE CONMUTACIÓN PARA EL INVERSOR BIDIRECCIONAL MULTINIVEL PUENTE COMPLETO/MEDIO PUENTE	77
4.4.1.	Estrategia de conmutación del convertidor cc/ca puente completo	78
4.4.1.1.	<i>Estrategia de conmutación para la modulación unipolar multinivel</i>	78
4.4.1.2.	<i>Estrategia de conmutación para la modulación de los dos vectores más cercanos</i>	79
4.4.2.	Estrategia de conmutación del convertidor ca/ca medio puente	79
4.5.	MODELADO DEL INVERSOR BIDIRECCIONAL MULTINIVEL PUENTE COMPLETO/MEDIO PUENTE	87

4.5.1.	Obtención de las ecuaciones de estado	89
4.5.2.	Promediado de las ecuaciones de estado	89
4.5.3.	Transformación a coordenadas DQ	90
4.5.4.	Linealización de la ecuación de espacio de estado promediada	91
4.6.	PROPUESTA DE CONTROL LQR EN COORDENADAS DQ PARA EL INVERSOR BIDIRECCIONAL MULTINIVEL BASADO EN LAS TOPOLOGÍAS PUENTE COMPLETO/MEDIO PUENTE	94
4.7.	CONCLUSIONES	94
5.	PROPUESTA DE INVERSOR BIDIRECCIONAL MULTINIVEL CON AISLAMIENTO EN ALTA FRECUENCIA BASADO EN LAS TOPOLOGÍAS <i>PUSH-PULL</i>/PUENTE COMPLETO	97
5.1.	DESCRIPCIÓN DEL INVERSOR BIDIRECCIONAL MULTINIVEL CON AISLAMIENTO EN ALTA FRECUENCIA <i>PUSH-PULL</i> /PUENTE COMPLETO	98
5.2.	DESCRIPCIÓN EN VECTORES DE ESTADO DE TENSIÓN V_{EF} DEL INVERSOR MULTINIVEL <i>PUSH-PULL</i> /PUENTE COMPLETO	99
5.3.	PROPUESTA DE ESTRATEGIA DE MODULACIÓN EN VECTORES DE ESTADO DE TENSIÓN V_{EF}	102
5.3.1.	Estrategia de modulación unipolar multinivel	102
5.3.2.	Estrategia de modulación de los dos vectores más cercanos	105
5.4.	PROPUESTA DE ESTRATEGIA DE CONMUTACIÓN PARA EL INVERSOR BIDIRECCIONAL MULTINIVEL <i>PUSH-PULL</i> /PUENTE COMPLETO	108
5.4.1.	Estrategia de conmutación del convertidor cc/ca <i>push-pull</i>	108
5.4.2.	Estrategia de conmutación del convertidor ca/ca puente completo	109
5.4.2.1.	<i>Estrategia para la conexión del punto e</i>	109
5.4.2.2.	<i>Estrategia para la conexión del punto f</i>	113
5.5.	MODELADO DEL INVERSOR BIDIRECCIONAL MULTINIVEL <i>PUSH-PULL</i> /PUENTE COMPLETO	116
5.5.1.	Obtención de las ecuaciones de estado	117
5.5.2.	Promediado de las ecuaciones de estado	118
5.5.3.	Transformación a coordenadas DQ	118
5.5.4.	Linealización de la ecuación de espacio de estado promediada	119

5.6. PROPUESTA DE CONTROL LQR EN COORDENADAS DQ PARA EL INVERSOR BIDIRECCIONAL MULTINIVEL BASADO EN LAS TOPOLOGÍAS PUENTE COMPLETO/MEDIO PUENTE	122
5.7. CONCLUSIONES	122
6. SIMULACIONES Y VALIDACIÓN EXPERIMENTAL	125
6.1. SIMULACIÓN DE LAS ESTRATEGIAS DE MODULACIÓN UTILIZANDO EL ENTORNO DE SIMULACIÓN DE MATLAB	128
6.1.1. Simulación de la estrategia de modulación para inversores de dos niveles	128
6.1.2. Simulación de la estrategia de modulación unipolar multinivel	130
6.1.3. Simulación de la estrategia de modulación de los dos vectores más cercanos	132
6.1.4. Simulación en lazo cerrado del inversor de dos niveles	134
6.2. REALIZACIÓN DE LOS PROTOTIPOS EXPERIMENTALES	135
6.2.1. Módulos de potencia utilizados para realizar los inversores	135
6.2.2. Construcción del inversor bidireccional de dos niveles con aislamiento en alta frecuencia utilizando en las topologías puente completo/puente completo	136
6.2.3. Construcción del inversor bidireccional multinivel con aislamiento en alta frecuencia basado en las topologías puente completo / medio puente	137
6.2.4. Construcción del inversor bidireccional multinivel con aislamiento en alta frecuencia basado en las topologías <i>push-pull</i> /puente completo	139
6.2.5. Disposición del filtro de salida pasabajos	140
6.2.6. Sensores de tensión y de corriente	141
6.2.7. Carga resistiva e inductiva utilizada para las pruebas	141
6.2.8. Panel de conexiones y placa de desarrollo	142
6.3. VALIDACIÓN EXPERIMENTAL DE LOS INVERSORES BIDIRECCIONALES DE DOS NIVELES Y MULTINIVEL CON AISLAMIENTO EN ALTA FRECUENCIA	143
6.3.1. Resultados en lazo abierto del inversor bidireccional de dos niveles con aislamiento en alta frecuencia utilizando las topologías puente completo/puente completo	145
6.3.1.1. Resultados utilizando una carga resistiva	145
6.3.1.2. Resultados utilizando una carga resistiva-inductiva	148
6.3.1.3. Resultados utilizando una carga no lineal	150

6.3.2.	Resultados en lazo abierto del inversor bidireccional de dos niveles con aislamiento en alta frecuencia utilizando las topologías puente completo/medio puente	152
6.3.2.1.	<i>Resultados utilizando una carga resistiva</i>	153
6.3.2.2.	<i>Resultados utilizando una carga resistiva-inductiva</i>	155
6.3.2.3.	<i>Resultados utilizando una carga no lineal</i>	156
6.3.3.	Resultados en lazo abierto del inversor bidireccional de dos niveles con aislamiento en alta frecuencia utilizando las topologías <i>push-pull</i> /puente completo	158
6.3.3.1.	<i>Resultados utilizando una carga resistiva</i>	159
6.3.3.2.	<i>Resultados utilizando una carga resistiva-inductiva</i>	160
6.3.4.	Resultados en lazo abierto del inversor bidireccional multinivel con aislamiento en alta frecuencia basado en las topologías puente completo/medio puente utilizando la modulación unipolar multinivel	162
6.3.4.1.	<i>Resultados utilizando una carga resistiva</i>	163
6.3.4.2.	<i>Resultados utilizando una carga resistiva-inductiva</i>	166
6.3.4.3.	<i>Resultados utilizando una carga no lineal</i>	167
6.3.5.	Resultados en lazo abierto del inversor bidireccional multinivel con aislamiento en alta frecuencia basado en las topologías puente completo/medio puente utilizando la modulación de los dos vectores más cercanos	169
6.3.5.1.	<i>Resultados utilizando una carga resistiva</i>	169
6.3.5.2.	<i>Resultados utilizando una carga resistiva-inductiva</i>	172
6.3.5.3.	<i>Resultados utilizando una carga no lineal</i>	174
6.3.6.	Resultados en lazo abierto del inversor bidireccional multinivel con aislamiento en alta frecuencia basado en las topologías <i>push-pull</i> /puente completo utilizando la modulación unipolar multinivel	175
6.3.6.1.	<i>Resultados utilizando una carga resistiva</i>	175
6.3.6.2.	<i>Resultados utilizando una carga resistiva-inductiva</i>	178
6.3.7.	Resultados en lazo abierto del inversor bidireccional multinivel con aislamiento en alta frecuencia basado en las topologías <i>push-pull</i> /puente completo utilizando la modulación de los dos vectores más cercanos	179
6.3.7.1.	<i>Resultados utilizando una carga resistiva</i>	180
6.3.7.2.	<i>Resultados utilizando una carga resistiva-inductiva</i>	182
6.3.8.	Resumen de resultados de distorsión armónica de los inversores	183
6.3.9.	Resultados de rendimiento de los inversores	184
6.3.10.	Resumen comparativo de topologías bidireccionales con aislamiento en alta frecuencia	186

6.3.11.	Resultados en lazo cerrado del inversor bidireccional de dos niveles con aislamiento en alta frecuencia utilizando las topologías puente completo/puente completo	186
6.3.12.	Resultados en lazo cerrado del inversor bidireccional de dos niveles con aislamiento en alta frecuencia utilizando las topologías puente completo/medio puente	187
6.3.12.1.	<i>Resultados en lazo abierto</i>	188
6.3.12.2.	<i>Resultados en lazo cerrado</i>	190
6.4.	CONCLUSIONES	193
7.	CONCLUSIONES	197
7.1.	INTRODUCCIÓN	198
7.2.	CONCLUSIONES PARTICULARES	200
7.3.	CONCLUSIONES GENERALES.....	201
7.4.	APORTACIONES DEL TRABAJO DE TESIS	202
7.5.	PROPUESTA DE TRABAJOS FUTUROS	203
	REFERENCIAS	205
	ANEXO A. PROGRAMAS EN VHDL	211
A.1.	Programa realizado para el accionamiento de un convertidor cc/ca puente completo	211
A.2.	Programa en VHDL para el accionamiento de un convertidor ca/ca	214
A.3.	Programa en VHDL para realizar la conexión del punto e del convertidor ca/ca	215

GLOSARIO DE ACRÓNIMOS Y ABREVIATURAS

DAT	Distorsión armónica total
DSP	Procesado digital de señales (<i>Digital Signal Processing</i>)
DQ	Sistema de referencia rotativo de Park
EMUM	Estrategia de modulación unipolar multinivel
EM2VMC	Estrategia de modulación de los dos vectores más cercanos
IBAAF	Inversor bidireccional con aislamiento en alta frecuencia
IBMAAF	Inversor bidireccional multinivel con aislamiento en alta frecuencia
IGBT	Transistor bipolar de puerta aislada (<i>Insulated Gate Bipolar Transistor</i>)
LQR	Regulador lineal cuadrático (<i>Linear Quadratic regulator</i>)
MOSFET	Transistor de efecto de campo, semiconductor óxido metálico (<i>Metal- oxide-semiconductor field effect transistors</i>)
PLD	Dispositivo lógico programable (<i>Programmable logic device</i>)
PWM	Modulación del ancho de pulso (<i>Pulse Width Modulation</i>)
SAF	Sistema de alimentación fotovoltaico
SAI	Sistema de alimentación ininterrumpida
SFA	Sistema fotovoltaico autónomo
VHDL	Lenguaje estándar de diseño electrónico (<i>Very High Speed Hardware Description Language</i>)

GLOSARIO DE SÍMBOLOS Y TÉRMINOS

bt	Tiempo de blanqueo
C	Capacidad del filtro de salida pasabajos
C_i	Capacidad del filtro de entrada
d	Eje d de coordenadas rotativas
d_d	Relación de conducción sobre el eje d
d_q	Relación de conducción sobre el eje q
d_v	relación de conducción sobre el eje real
f_o	Frecuencia de la tensión de salida
f_s	Frecuencia de conmutación del inversor
i_L	Corriente por el inductor del filtro de salida pasabajos
i_{Ld}	Corriente por el inductor del filtro de salida sobre el eje d
i_{Lq}	Corriente por el inductor del filtro de salida sobre el eje q
i_o	Corriente de salida del inversor
J	Función de coste del controlador LQR
[Ki]	Matriz de control integral
[Kp]	Matriz de control proporcional
L	Inductancia del filtro pasabajos
L_d	Inductancia de dispersión
L_m	Inductancia magnetizante
m	Amplitud de la tensión de referencia
mf	módulo funcional formado por dos transistores con sus respectivas fuentes de alimentación y disipadores de potencia
N	Nivel de tensión asociado al valor absoluto de la tensión de referencia
q	Eje q de coordenadas rotativas
[Q]	Matriz de pesos de variables de estado en el controlador LQR
R	Carga resistiva
[R]	Matriz de pesos de entradas del controlador LQR

rt	Relación de transformación del transformador de potencia
S	Señal moduladora
sp	Semiperiodo de la tensión de referencia
st	Tiempo de muestreo
T_s	Periodo de conmutación del inversor
tt	Tiempo de traslape
[u]	Vector de entrada o variables de control de un sistema
V	Vector de tensión
V_{ab}	Tensión de salida del convertidor cc/ca
V_{ef}	Tensión de salida del convertidor ca/ca
V_i	Tensión del bus de continua
V_o	Tensión de salida del inversor
V_{od}	Tensión de salida del inversor sobre el eje d
V_{oq}	Tensión de salida del inversor sobre el eje q
V_{ref}	Tensión de referencia
[x]	Matriz de variables de estado
α	Eje real
β	Eje imaginario
θ	Ángulo del vector de referencia
ω	Frecuencia angular