

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA

Departament d'Enginyeria Electrònica

**“MODELOS NO LINEALES Y CONTROL
EN MODO DESLIZAMIENTO DE
CONVERTIDORES DE ESTRUCTURA
RESONANTE”**

Autor: Miguel Castilla Fernández
Director: Jose Luis García de Vicuña

Mayo de 1998

AGRADECIMIENTOS

Quisiera agradecer a los profesores:

- Joan Peracaula i Roura, Catedrático de Universidad, *Universitat Politècnica de Catalunya*,
- Joan Majó i Roca, Catedrático de Escuela Universitaria, *Universitat Politècnica de Catalunya*,
- Javier Uceda Antolín, Catedrático de Universidad, Universidad Politécnica de Madrid,
- Francisco Javier Sebastián Zuñiga, Catedrático de Universidad, Universidad de Oviedo,
- Leopoldo García Franquelo, Catedrático de Universidad, Universidad de Sevilla,

por haber aceptado formar parte del tribunal de esta tesis, y en especial, a Javier Uceda y Javier Sebastián por las sugerencias y observaciones que me han hecho llegar como revisores del trabajo.

También deseo expresar mi más sincero agradecimiento a todas las personas que han colaborado directa o indirectamente en la realización de este trabajo.

Especialmente a Luis García de Vicuña, por la brillante dirección de la tesis y de los trabajos de investigación realizados durante estos últimos años.

A Jaume Ordinas, por su participación en los primeros trabajos teóricos con convertidores resonantes y control en modo de deslizamiento.

A Mariano López, por recoger con tanto acierto el testigo dejado por Jaume, por su constante y correcta dedicación al estudio de diversas aplicaciones de los convertidores de alta frecuencia, y además, por su apoyo y amistad.

De nuevo a Mariano, y también a Genís Chapinal, Tolo Torres y David Peña por la realización de los montajes y los ensayos de laboratorio.

A Toni Sánchez, Pere Gaya, Pepe Matas y Oscar López, por el soporte y actuaciones puntuales en relación a algunos temas tratados, y además, por formar parte, junto a Luis y Mariano, del grupo de potencia de Vilanova.

También a Carmen Rueda, por sus expertas recomendaciones sobre los aspectos relacionados con la redacción del lenguaje técnico.

Por último, mi especial agradecimiento a Ana Ruth y a mis padres, sin los que este trabajo hubiese sido irrealizable.

Gracias a todos.

ÍNDICE

1. INTRODUCCIÓN	
1.1. GENERALIDADES	1
1.2. CLASIFICACIÓN DE CONVERTIDORES RESONANTES	2
1.3. MODELADO Y CONTROL DE CONVERTIDORES RESONANTES	3
1.4. OBJETIVOS DE LA TESIS	7
2. CONVERTIDORES DE ESTRUCTURA RESONANTE OPERANDO A FRECUENCIA DE RESONANCIA	
2.1. INTRODUCCIÓN	9
2.2. CONVERTIDOR RESONANTE SERIE	10
2.3. CONVERTIDOR RESONANTE SERIE CON DOS ACCIONES DE CONTROL	14
2.4. CONVERTIDOR RESONANTE PARALELO	19
2.5. CONVERTIDOR RESONANTE SERIE-PARALELO	23
2.6. CONCLUSIONES	25
3. MODELOS NO LINEALES DE CONVERTIDORES DE ESTRUCTURA RESONANTE	
3.1. INTRODUCCIÓN	26
3.2. FORMULACIÓN DE UN MODELO PROMEDIADO NO LINEAL	
3.2.1. Clasificación de las variables de estado	27
3.2.2. Promediado de la ecuación de estado	27
3.2.3. Límites de validez del modelo	29
3.3. APLICACIÓN DEL MODELO NO LINEAL A UN CONVERTIDOR RESONANTE SERIE CONTROLADO EN FRECUENCIA	
3.3.1. Clasificación de las variables de estado	30
3.3.2. Modelo promediado no lineal	31
3.3.3. Análisis en régimen estacionario	32
3.3.4. Verificación del modelo mediante simulación	33

3.4.	APLICACIÓN DEL MODELO NO LINEAL A CONVERTIDORES RESONANTES <i>QUANTUM</i> SERIE	
3.4.1.	Modelo promediado no lineal	34
3.4.2.	Análisis en régimen estacionario	36
3.4.3.	Modo de conducción discontinua	38
3.4.4.	Resultados de simulación	42
3.5.	APLICACIÓN DEL MODELO NO LINEAL A CONVERTIDORES RESONANTES <i>QUANTUM</i> PARALELO	
3.5.1.	Modelo promediado no lineal	47
3.5.2.	Análisis en régimen estacionario	48
3.5.3.	Modo de conducción discontinua	50
3.5.4.	Resultados de simulación	51
3.6.	APLICACIÓN DEL MODELO NO LINEAL A UN CONVERTIDOR RESONANTE <i>QUANTUM</i> SERIE-PARALELO	
3.6.1.	Modelo promediado no lineal	51
3.6.2.	Análisis en régimen estacionario	56
3.6.3.	Resultados de simulación	57
3.7.	CONCLUSIONES	57
4.	CONTROL EN MODO DE DESLIZAMIENTO DE REGULADORES CONMUTADOS BASADOS EN CONVERTIDORES RESONANTES	
4.1.	CONTROL DE CONVERTIDORES RESONANTES <i>QUANTUM</i>	62
4.2.	DISEÑO DE CONTROLADORES EN MODO DE DESLIZAMIENTO BASADO EN EL MÉTODO DEL CONTROL EQUIVALENTE	
4.2.1.	Introducción	63
4.2.2.	Modelado del sistema y estructura del controlador	64
4.2.3.	Condiciones para la existencia de un régimen deslizante	64
4.2.4.	Control equivalente	66
4.2.5.	Dominio de atracción	68
4.2.6.	Diseño de las leyes de control	68
4.2.7.	Conclusiones	69
4.3.	DISEÑO DE CONTROLADORES EN MODO DE DESLIZAMIENTO BASADO EN EL SEGUNDO MÉTODO DE LYAPUNOV	
4.3.1.	Introducción	70
4.3.2.	Estabilidad de un convertidor conmutado en lazo abierto	70

4.3.3.	Diseño de las superficies de deslizamiento y las leyes de control	71
4.3.4.	Aplicación a convertidores resonantes <i>Quantum</i>	73
4.3.5.	Realización de los controladores	77
4.3.6.	Resultados de simulación	79
4.3.7.	Conclusiones	84
4.4.	CONTROLADORES BASADOS EN SUPERFICIES DE DESLIZAMIENTO CON TÉRMINOS INTEGRALES	
4.4.1.	Introducción	86
4.4.2.	Existencia de error en régimen estacionario	86
4.4.3.	Superficies de deslizamiento con términos integrales	88
4.4.4.	Diseño de los controladores	90
4.4.5.	Realización de los controladores	96
4.4.6.	Resultados de simulación	100
4.4.7.	Conclusiones	110
4.5.	CONCLUSIONES	111
5.	CONTROL EN MODO DE DESLIZAMIENTO DE SISTEMAS DE POTENCIA RESONANTES CON REFERENCIA EXTERNA VARIABLE	
5.1.	INTRODUCCIÓN	113
5.2.	DISEÑO DE CONTROLADORES EN MODO DE DESLIZAMIENTO CON SUPERFICIES DEPENDIENTES DEL TIEMPO	113
5.3.	ONDULADOR RESONANTE BASADO EN EL CONVERTIDOR QSRC CON DOS ACCIONES DE CONTROL	
5.3.1.	Introducción	116
5.3.2.	Estructura del ondulator	117
5.3.3.	Diseño del control	118
5.3.4.	Resultados de simulación	119
5.3.5.	Conclusiones	123
5.4.	RECTIFICADOR RESONANTE BASADO EN EL CONVERTIDOR QPRC CON DOS ACCIONES DE CONTROL	
5.4.1.	Introducción	123
5.4.2.	Configuración del rectificador	124
5.4.3.	Diseño del control	125
5.4.4.	Resultados de simulación	127
5.4.5.	Conclusiones	130

5.5.	TRANSFORMADOR ELECTRÓNICO BASADO EN UNA NUEVA TOPOLOGÍA RESONANTE	
5.5.1.	Introducción	130
5.5.2.	Configuración del transformador	131
5.5.3.	Modelo promediado de la etapa de potencia	134
5.5.4.	Estructura y diseño del controlador	135
5.5.5.	Resultados de simulación	138
5.5.6.	Conclusiones	143
5.6.	CONCLUSIONES	144
6.	RESULTADOS EXPERIMENTALES	
6.1.	INTRODUCCIÓN	145
6.2.	REGULADOR QSRC CON DOS ACCIONES DE CONTROL	
6.2.1.	Introducción	145
6.2.2.	Esquema del regulador	145
6.2.3.	Formas de onda del regulador	147
6.2.4.	Prestaciones del prototipo	153
6.3.	REGULADOR <i>BOOST</i> QPRC	
6.3.1.	Introducción	154
6.3.2.	Esquema del regulador	154
6.3.3.	Formas de onda del regulador	155
6.3.4.	Prestaciones del prototipo	160
6.4.	ONDULADOR QSRC CON DOS ACCIONES DE CONTROL	
6.4.1.	Introducción	160
6.4.2.	Esquema del ondulator	160
6.4.3.	Formas de onda del ondulator	162
6.4.4.	Prestaciones del prototipo	170
6.5.	TRANSFORMADOR <i>BUCK</i> QSRC	
6.5.1.	Introducción	170
6.5.2.	Esquema del transformador	171
6.5.3.	Formas de onda del transformador	172
6.5.4.	Prestaciones del prototipo	181
6.6.	CONCLUSIONES	182

7. CONCLUSIONES

7.1. INTRODUCCIÓN	184
7.2. ANTECEDENTES	184
7.3. CONCLUSIONES GENERALES	185
7.4. FUTURAS LÍNEAS DE TRABAJO	
7.4.1. Síntesis de nuevas topologías de conversión	188
7.4.2. Circuitos integrados de control específicos	188
7.4.3. Técnicas avanzadas de control	189
7.4.4. Aplicaciones de los convertidores resonantes <i>Quantum</i>	189

BIBLIOGRAFÍA

B-I

ANEXOS

A.1. ESQUEMA DEL REGULADOR QSRC CON DOS ACCIONES DE CONTROL	A-I
A.2. ESQUEMA DEL REGULADOR <i>BOOST</i> QPRC	A-IV
A.3. ESQUEMA DEL ONDULADOR QSRC CON DOS ACCIONES DE CONTROL	A-VI
A.4. ESQUEMA DEL TRANSFORMADOR <i>BUCK</i> QSRC	A-X