

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 |