

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

7. CONCLUSIONES

7.1. INTRODUCCIÓN

Este último capítulo se destina a enumerar las conclusiones de los puntos desarrollados a lo largo del presente trabajo de investigación, prestando especial atención a las aportaciones realizadas por el autor en el área de la modelización de convertidores de estructura resonante y en la concepción y el diseño de controladores en modo de deslizamiento para este tipo de sistemas de potencia.

En la parte final del capítulo se marcan futuras líneas que dan continuidad al presente trabajo de investigación en el área de los convertidores de potencia de alta frecuencia y en la aplicación de técnicas avanzadas de control.

7.2. ANTECEDENTES

El presente trabajo de investigación se ha centrado en el establecimiento de modelos no lineales y en la aplicación de la técnica de control en modo de deslizamiento en convertidores resonantes *Quantum*.

Los convertidores *Quantum*, propuestos originalmente por G.B.Joung, C.T.Rim y G.H.Cho en [34]-[36], son estructuras de conversión resonantes que operan a frecuencia de resonancia y en las que el transvase energético se realiza en forma de paquetes de energía de duración discreta. Tanto en estos trabajos iniciales como en los realizados más tarde por otros grupos de investigadores asiáticos [37]-[47], la caracterización de los convertidores *Quantum* se efectúa mediante unos modelos discretos, que contemplan la evolución de los valores de pico de las variables de estado resonantes rectificadas.

Como alternativa a la utilización de controladores predictivos en los convertidores *Quantum* [38]-[41], un grupo de investigadores franceses proponen la utilización de técnicas de control en modo deslizamiento en un convertidor resonante serie [64][65]. En estos trabajos iniciales, el diseño de los controladores deslizantes se realiza mediante el método del control equivalente [48][49], y toma como punto de partida un modelo promediado continuo de la etapa de potencia, que obtienen aplicando la aproximación de Taylor a los modelos discretos deducidos en [35].

El hecho que las ecuaciones de estado de los convertidores *Quantum* y los modelos utilizados para el control sean continuos, y sin embargo, la consecución de estos últimos pase por la discretización de los primeros, motiva al autor al estudio de la bibliografía especializada en el tema de la modelización de convertidores resonantes [19]-[23]. Por otra parte, la dificultad para elegir una superficie de deslizamiento que proporcione al sistema el comportamiento deseado como paso previo a la aplicación del método del control equivalente hace crecer en el autor el interés por la metodología de diseño de controladores en modo de deslizamiento, que le lleva al estudio de la siguiente bibliografía específica [48]-[55]. Como fruto del trabajo de investigación en estas dos áreas, la publicación de los artículos [82] y [86] constituye el inicio de la presente tesis doctoral.

7.3. CONCLUSIONES GENERALES

El presente trabajo de investigación se ha dedicado al estudio y la caracterización de un conjunto de sistemas electrónicos de potencia basados en convertidores resonantes *Quantum* con subsistemas de control en modo de deslizamiento, utilizados en aplicaciones de estabilización de tensión y seguimiento de señal.

El trabajo se inicia con la presentación detallada del principio de funcionamiento de un amplio conjunto de convertidores *Quantum*, incluyendo la descripción de la estrategia de actuación sobre los interruptores y la identificación de las posibles acciones de control de acuerdo con el modo de operación seleccionado. Este estudio ha facilitado la deducción de unos modelos que permiten agrupar las ecuaciones de estado de más de un convertidor por medio de dos variables de control.

En el capítulo 3 se desarrolla un nuevo procedimiento de modelado de convertidores de estructura resonante, basado en la clasificación y aproximación de las variables de estado según su comportamiento dinámico [86]. La aplicación del método a un convertidor resonante serie controlado en frecuencia y a los convertidores *Quantum* presentados en el capítulo 2 ha proporcionado unos modelos que tienen en común las características que se enumeran a continuación:

- 1) Son modelos promediados y continuos, y se derivan de forma sistemática sin necesidad de operar con ecuaciones de tiempo discreto.
- 2) Son válidos en modo de conducción continua, ya que se basan en considerar que las tensiones y corrientes resonantes son funciones senoidales, con amplitudes y fases variables en el tiempo.
- 3) Describen muy acertadamente el comportamiento de los convertidores de estructura resonante, ya que sus variables de estado siguen la evolución de la envolvente de las corrientes y tensiones resonantes y del valor medio de las variables de estado de los filtros de entrada y salida.
- 4) Son válidos tanto en régimen transitorio como en el estacionario, y además, también en gran señal, ya que se deducen sin considerar aproximaciones de pequeña señal.
- 5) Es posible identificar modelos de orden reducido, que contienen las entradas de control, la tensión de entrada y la carga, y las variables de estado promediadas más significativas.

Por lo tanto, la simplicidad de los modelos resultantes y su amplio margen de validez hacen del método de modelado propuesto en este trabajo la herramienta adecuada para la caracterización de los convertidores resonantes y la introducción de técnicas de control no lineales en esta clase de estructuras de conversión.

En el capítulo 4 se propone un nuevo procedimiento de diseño de controladores en modo de deslizamiento para reguladores conmutados con múltiples entradas de control [82], basado en el segundo método de Lyapunov y en el método del control equivalente. La utilización del método proporciona la configuración de las superficies de deslizamiento y las leyes de control que garantizan un comportamiento óptimo de los reguladores de tensión, y al mismo tiempo, facilita la determinación de las principales restricciones que deben satisfacer los parámetros de los controladores para el correcto funcionamiento de estos sistemas.

La aplicación del método a los modelos promediados de los convertidores *Quantum* ha permitido derivar la estructura de unos subsistemas de control que tienen en común las

características que se señalan a continuación:

- 1) Las superficies de deslizamiento incluyen un término integral del error de la tensión de salida, que garantiza que la salida del regulador en régimen estacionario coincida con su nivel de referencia deseado, incluso en presencia de una variación en la tensión de entrada, la carga o en otros parámetros del sistema.
- 2) La presencia en las superficies de deslizamiento de un término proporcional del error de la tensión de salida proporciona un parámetro de control en el establecimiento de la respuesta dinámica de los reguladores.
- 3) La introducción de un término diferencial del error de la tensión de salida en las superficies de deslizamiento es únicamente posible en los convertidores resonantes que se caracterizan porque la dinámica de la tensión de salida no depende directamente de las entradas de control. En esos casos, la presencia de variables de estado en las superficies de deslizamiento es mínima.
- 4) Además de los términos PID del error de la tensión de salida, las superficies de deslizamiento disponen de las variables de estado necesarias para garantizar el correcto funcionamiento de los reguladores.
- 5) La realización de los controladores deslizantes precisa de un número reducido de variables de estado de la etapa de potencia, lo que simplifica la circuitería de sensado y la generación de las superficies de conmutación.

Por lo tanto, la posibilidad de aplicación en convertidores con múltiples entradas de control, el excelente comportamiento de los convertidores que lo utilizan y la simplicidad de los subsistemas de control resultantes hacen del método de diseño desarrollado en el capítulo 4 la herramienta adecuada para el establecimiento de controladores en modo de deslizamiento de reguladores de tensión conmutados.

En el capítulo 5 se realiza una revisión del método de diseño de controladores deslizantes propuesto en el capítulo anterior, de forma que también pueda ser utilizado en aplicaciones de seguimiento de señal. La adaptación del método consiste básicamente en la inclusión de términos en las superficies de deslizamiento que dependen directamente del tiempo, lo que obliga a plantearse el estudio de las situaciones más desfavorables en la determinación de las restricciones que deben satisfacer los parámetros de los controladores.

La aplicación del método a un conjunto de sistemas de potencia resonantes con referencia externa variable (un ondulator, un circuito corrector del factor de potencia y un transformador electrónico) ha proporcionado la configuración de unos subsistemas de control que mantienen las características básicas de los controladores derivados en el capítulo 4 y que facilitan un seguimiento suficientemente satisfactorio de la referencia externa de baja potencia.

Finalmente se implementan cuatro prototipos básicos suficientemente representativos del problema de estabilización de tensión y de seguimiento de señal en este tipo de sistemas. Los estudios teóricos realizados a lo largo del presente trabajo y el análisis de los resultados de simulación y de las medidas efectuadas sobre los prototipos básicos han permitido derivar las propiedades más significativas de los convertidores resonantes *Quantum* y de la utilización de controladores en modo de deslizamiento en estos sistemas, las cuales pueden resumirse en los siguientes puntos:

- 1) Los convertidores *Quantum* operan a frecuencia de resonancia, lo que provoca que las formas de onda de las tensiones y corrientes resonantes sean perfectamente senoidales.

Este hecho concentra el espectro de las interferencias electromagnéticas en una banda estrecha alrededor de la frecuencia de resonancia, lo que simplifica la circuitería de procesado de las mismas.

- 2) Todos los dispositivos de la etapa de potencia conmutan a tensión o corriente cero, lo que produce pérdidas de conmutación prácticamente nulas y permite el funcionamiento de los convertidores a elevadas frecuencias de conmutación sin que se produzca un deterioro importante del rendimiento de los sistemas.
- 3) Los convertidores *Quantum* reproducen el comportamiento de las células de conversión convencionales *Buck*, *Boost*, *Buck-Boost* y *Cuk*, cuando son gobernados mediante una única variable de control. Por otra parte, la utilización de dos variables de control permite el transvase energético entre la fuente de entrada y el tanque resonante y entre este y la carga de forma totalmente independiente.
- 4) La modulación de amplitud que sufren las variables de estado resonantes producen unos picos de tensión y corriente mayores que los que aparecen con la utilización de otras técnicas de control (control en frecuencia o control de fase).
- 5) La técnica de control en modo de deslizamiento dota a los convertidores *Quantum* de gran robustez frente a variaciones de sus parámetros y en presencia de perturbaciones externas. Este hecho se debe básicamente a la presencia en las superficies de deslizamiento de un término integral del error de la tensión de salida.
- 6) La salida de los convertidores *Quantum* que utilizan una única entrada de control presenta un cierto sobreimpulso y un determinado tiempo de establecimiento cuando se produce una variación de las condiciones de trabajo del sistema. No obstante, la elección adecuada de las ganancias de los términos proporcional e integral de las superficies de deslizamiento permite adecuar la respuesta del sistema a las especificaciones de diseño.
- 7) La dinámica de los convertidores que disponen de dos acciones de control es excelente, tanto en aplicaciones de estabilización de tensión como en seguimiento de señal. En concreto, la salida de estos sistemas es prácticamente insensible a perturbaciones externas, siempre que se cumplan las condiciones de diseño de los parámetros del controlador.
- 8) Los sistemas resonantes con referencia externa variable estudiados en este trabajo suministran el nivel de potencia deseado a cargas de diferente naturaleza (cargas resistivas, inductivas y electrónicas).
- 9) En general, los convertidores que disponen de dos entradas de control requieren un mayor número de interruptores en la etapa de potencia, lo que resulta en un menor rendimiento del equipo.

Es necesario remarcar la existencia de un compromiso de diseño entre la consecución de una excelente respuesta dinámica y un elevado rendimiento, de acuerdo con la elección de topologías resonantes con una o dos acciones de control. De hecho, será el cumplimiento de las especificaciones de diseño de cada aplicación concreta las que determinarán la estructura final de la etapa de potencia.

El presente trabajo de investigación ha puesto de manifiesto que los sistemas electrónicos de potencia basados en convertidores resonantes *Quantum* con control en modo de deslizamiento pueden ser una alternativa real a otros sistemas de potencia convencionales en aplicaciones de estabilización de tensión y seguimiento de señal.

7.4. FUTURAS LÍNEAS DE TRABAJO

En el presente apartado se consideran diversas propuestas de trabajo que dan una continuidad lógica a los estudios realizados en esta tesis doctoral en el área de los convertidores de potencia de alta frecuencia y en la aplicación de técnicas avanzadas de control.

7.4.1. SÍNTESIS DE NUEVAS ESTRUCTURAS DE CONVERSIÓN

En la actualidad, la mayoría de convertidores *Quantum* disponen de un circuito resonante constituido por un inductor y un condensador en serie o en paralelo [34]-[45]. Con la inclusión de nuevos elementos reactivos en el circuito tanque se consigue mejorar las limitaciones de las topologías resonantes con dos elementos, y al mismo tiempo, se amplía el abanico de posibles aplicaciones de los convertidores *Quantum*.

Por ejemplo, el regulador conmutado CC-CC basado en el convertidor resonante serie-paralelo QSPRC propuesto en el capítulo 4 presenta una respuesta dinámica muy rápida, y además, puede alimentar a un conjunto de cargas mucho más amplio que los reguladores basados en los convertidores resonantes serie QSRC y paralelo QPRC. Por otra parte, en el capítulo 5 se ha estudiado un transformador electrónico basado en un circuito resonante que dispone de un inductor y dos condensadores.

Estos resultados tan alentadores propician el planteamiento de una nueva línea de trabajo consistente en la búsqueda sistemática de nuevas topologías de conversión con tres o más elementos en el circuito tanque. Este trabajo de investigación puede iniciarse con el estudio de la bibliografía específica de síntesis de estructuras resonantes [12][13], y con la consiguiente selección de las topologías en las que pueda realizarse el transvase energético en forma de paquetes discretos de energía (topologías *Quantum*).

7.4.2. CIRCUITOS INTEGRADOS DE CONTROL ESPECÍFICOS

La integración de los subsistemas de control de los convertidores conmutados presenta una serie de ventajas bien conocidas en relación al empleo de componentes discretos: reducción notable del tamaño y peso de los equipos, aumento de la fiabilidad, posibilidad de realización de funciones más complejas, reducción del coste y aumento de la velocidad de respuesta del control [84].

Actualmente, los únicos convertidores que disponen de circuitos integrados de control comerciales son los convertidores PWM, los convertidores cuasi-resonantes y los convertidores resonantes controlados en frecuencia y en fase. En consecuencia, si se desea que los convertidores resonantes *Quantum* se beneficien de las ventajas anteriores será necesario la realización de circuitos integrados de control específicos.

Por lo tanto, se plantea una línea de trabajo en el área de la microelectrónica analógica consistente en la realización de microcircuitos específicos de control. Este trabajo puede iniciarse con la integración de los controladores en modo de deslizamiento propuestos a lo largo del presente trabajo de investigación, para posteriormente, estudiar la implementación de controladores más complejos y que añadan una serie de prestaciones adicionales, como por ejemplo, la programación de los parámetros del control.

7.4.3. TÉCNICAS AVANZADAS DE CONTROL

La técnica de control en modo de deslizamiento dota a los convertidores resonantes *Quantum* de unas prestaciones suficientemente satisfactorias, como ha quedado demostrado a lo largo del presente trabajo de investigación. Además, estas características se consiguen con unos subsistemas de control que han sido seleccionados teniendo en cuenta como criterio básico la simple realización práctica de los mismos.

No obstante, la utilización de circuitos de control específicos facilita la introducción de una circuitería integrada que permite la realización de controladores complejos. Este hecho favorece un cambio de criterio en la selección de los controladores en modo de deslizamiento, dando mayor importancia a otras características consideradas en un segundo término en este trabajo. Por ejemplo, la metodología de concepción y diseño de superficies de conmutación basada en la imposición de una determinada respuesta dinámica en la salida de los convertidores *Quantum*, que fue comentada en el capítulo 4 y descartada debido a la gran dificultad asociada a la generación de las superficies resultantes, adquiere bajo esta perspectiva una importancia significativa.

Por otra parte, la posibilidad de realización de controladores complejos mediante circuitos integrados específicos propicia el planteamiento de una nueva línea de trabajo orientada a un estudio de viabilidad de la utilización de otras técnicas avanzadas para el control de los convertidores *Quantum*.

7.4.4. APLICACIONES DE LOS CONVERTIDORES RESONANTES *QUANTUM*

El trabajo de investigación desarrollado en esta tesis doctoral debe ser contemplado como un estudio básico de los convertidores resonantes *Quantum*, encaminado a la consecución de herramientas de análisis y caracterización de las etapas de potencia y de diseño de los subsistemas de control. De acuerdo con esta concepción, los ejemplos de aplicación estudiados han sido utilizados fundamentalmente para ilustrar el empleo de estas herramientas básicas.

Como continuación natural de este trabajo, se plantea un estudio de viabilidad de la utilización de los convertidores resonantes *Quantum* con subsistemas de control en modo de deslizamiento en aplicaciones prácticas, como cargadores de baterías, alimentación de lámparas fluorescentes, halógenas y tubos de descarga, alimentación de equipos electrónicos en aviones y satélites artificiales, alimentación de equipos portátiles, sistemas de alimentación ininterrumpida, control de la velocidad de motores, amplificadores de potencia, etc.

No cabe duda que el correcto desarrollo de esta idea se vería facilitado por medio de la colaboración con entidades o empresas relacionadas con equipos comerciales de características similares a las que se pretenden conseguir con los sistemas electrónicos de potencia estudiados en este trabajo.