

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

1. INTRODUCCIÓN

1.1. GENERALIDADES

La Electrónica de Potencia es la parte de la física aplicada que se ocupa de la conversión de la energía eléctrica, para su adaptación a diversas aplicaciones tales como fuentes de alimentación estabilizadas, accionamiento de motores eléctricos, sistemas de alimentación ininterrumpida, alumbrado fluorescente a alta frecuencia, calentamiento por inducción a radiofrecuencia, aplicaciones aeroespaciales, ...

A los elementos que realizan la conversión de las características de la energía eléctrica se les denomina convertidores, y en función del tipo de conversión se clasifican en rectificadores (convertidores CA-CC), onduladores (convertidores CC-CA), convertidores CC-CC y convertidores CA-CA.

Los convertidores CC-CC pueden ser clasificados en dos grandes grupos atendiendo a la zona en la que operan los dispositivos activos que los componen: convertidores lineales y convertidores conmutados.

Entre las ventajas de los convertidores lineales cabe destacar la sencillez en el diseño y la simplicidad de utilización; por contra, presentan un pobre rendimiento y resultan pesados y voluminosos para potencias moderadamente elevadas. Esto hace que normalmente sean utilizados en aplicaciones de baja potencia, en las que el rendimiento no es una característica fundamental [1].

Frente a los convertidores lineales, los convertidores conmutados mejoran las relaciones potencia/peso y peso/volumen de los equipos, presentan un mayor rendimiento y una mejor respuesta dinámica. Sin embargo, el diseño es complejo, y además, generan interferencias electromagnéticas que pueden alterar el funcionamiento de otros circuitos del sistema. A pesar de estos inconvenientes la utilización de estos convertidores queda suficientemente justificada en aplicaciones que requieran un elevado rendimiento [1][2].

El mercado actual requiere de equipos de potencia pequeños, ligeros y eficientes. Estas prestaciones se consiguen con el incremento de la frecuencia de operación de los convertidores conmutados que operan con pérdidas de conmutación prácticamente nulas [3].

En los convertidores conmutados convencionales, gobernados generalmente mediante un modulador de anchura de pulsos (PWM), el aumento de la frecuencia de funcionamiento conlleva un incremento considerable de las pérdidas, ya que el proceso de conmutación se caracteriza por la coexistencia de niveles de corriente y tensión elevados. Además, el nivel de interferencias electromagnéticas generado por estos convertidores también es apreciable, debido a sus típicas formas de onda trapezoidales. Aun así, estos convertidores se utilizan ampliamente en aplicaciones de baja y media potencia.

Con los convertidores conmutados de estructura resonante se consigue una disminución drástica de las pérdidas de conmutación, debido a las formas de onda prácticamente senoidales de los tanques resonantes, las cuales producen transiciones suaves en las corrientes o tensiones de los interruptores durante el paso de bloqueo a conducción y viceversa. Asimismo, estas formas de onda reducen notablemente la generación de armónicos de alta frecuencia, lo que se traduce en una disminución de las interferencias electromagnéticas en el dominio de las radiofrecuencias [3].

Sin embargo, las formas de tensión y corriente presentan un elevado factor de forma, en contraste con los convertidores convencionales, lo que se traduce en un aumento de las pérdidas de conducción en los semiconductores y en los componentes reactivos. No obstante, este inconveniente queda sobradamente compensado por la gran disminución de las pérdidas de conmutación en los interruptores [3][4].

1.2. CLASIFICACIÓN DE LOS CONVERTIDORES RESONANTES

Los convertidores resonantes se dividen en dos grandes categorías atendiendo al número de interruptores que disponen: convertidores de interruptor único y convertidores de varios interruptores [5][24].

Dentro del primer grupo se encuentran los convertidores en clase E, que son una derivación del amplificador en clase E de radiofrecuencia, y los convertidores a interruptor resonante o cuasi-resonantes, que se obtienen al introducir el concepto de interruptor resonante en las estructuras clásicas de conversión [6]. Un interruptor resonante no es más que un interruptor controlado convencional acompañado de una red auxiliar consistente en un diodo, una bobina y un condensador, de forma que se consigue conmutación a corriente cero o a tensión cero, dando lugar a los convertidores denominados ZCS (*Zero-Current Switching*) y ZVS (*Zero-Voltage Switching*), respectivamente.

Entre las características de los convertidores de interruptor único destacan las siguientes: los convertidores en clase E son estructuras extremadamente difíciles de analizar y diseñar, en los convertidores cuasi-resonantes se obtienen rendimientos muy elevados cuando operan a frecuencias de conmutación del orden de MHz, y ambos tipos de convertidores encuentran su dominio de aplicación en potencias medias y bajas.

Por otra parte, la utilización de los convertidores resonantes de varios interruptores queda plenamente justificada en aplicaciones donde sea necesario manipular potencias elevadas. Estas topologías de conversión, también conocidas como convertidores de estructura resonante, se obtienen al conectar en cascada un ondulator resonante en semipunto o en puente completo con un rectificador y un filtro pasa-bajos. Asimismo, si se desea aislamiento entre la entrada y la salida del convertidor, es necesario incluir un transformador de alta frecuencia entre el ondulator y el rectificador.

Los convertidores de estructura resonante presentan diversas configuraciones, en función de parámetros como el tipo de alimentación, el número de interruptores, el número y la ubicación de los elementos resonantes, la colocación de la carga respecto al tanque resonante y el tipo de filtro utilizado en la salida del convertidor [12][13]. A continuación se comenta la influencia de cada uno de estos parámetros en la estructura final de la topología del convertidor:

- 1) La alimentación de estos convertidores puede ser en tensión o en corriente. Sin embargo, a menudo la fuente de energía es una tensión continua no regulada, obtenida mediante rectificación de la tensión de red, lo que provoca que en aquellas topologías que deban ser alimentadas en corriente sea necesario incluir un inductor de elevado valor para emular el comportamiento de una fuente de corriente.
- 2) Asimismo, la naturaleza de la fuente de energía de entrada condiciona el tipo de interruptor a utilizar: cuando la entrada es en tensión son necesarios interruptores

bidireccionales en corriente y unidireccionales en tensión, mientras que si la entrada es en corriente se requiere de interruptores bidireccionales en tensión y unidireccionales en corriente. Tales interruptores pueden sintetizarse mediante la conexión en antiparalelo de un transistor y un diodo para el primer tipo de alimentación, y en serie para el segundo.

- 3) Los interruptores pueden conectarse en semipunto o en puente completo. Para conseguir la misma potencia en la salida del convertidor resonante, la topología en puente completo requiere la mitad de la corriente de entrada al convertidor que la estructura en semipunto. En consecuencia, las estructuras en puente completo son las principales candidatas a ser utilizadas en aplicaciones de alta potencia.
- 4) Tradicionalmente, los circuitos resonantes más habituales están constituidos por un inductor y un condensador conectados en serie o en paralelo. No obstante, muchas de las limitaciones de las topologías de conversión resonante de dos elementos reactivos pueden superarse añadiendo más elementos reactivos en el tanque resonante; además, cuando se opera a elevada frecuencia de conmutación es preciso considerar el efecto de los elementos reactivos parásitos que aparecen en estas estructuras de conversión y que incrementan el orden del circuito resonante. Estos motivos han propiciado la búsqueda sistemática de nuevas topologías de conversión con tres o más elementos en el circuito tanque, que fue iniciada por Severns y Batarseh [12][13], lo que se ha traducido hoy día en el conocimiento de un amplio abanico de topologías resonantes con dos, tres y cuatro elementos en el circuito resonante.
- 5) Según la colocación de la carga en relación al circuito resonante es posible dividir a las topologías resonantes en dos grandes grupos: convertidores con la carga conectada en serie y convertidores con la carga en paralelo.
- 6) La ubicación de los elementos de la red resonante y la colocación de la carga en relación a estos determina si la rectificación se realizará en tensión o en corriente, lo que impone la topología del filtro de salida.

Por ejemplo, dos topologías clásicas de convertidores de estructura resonante son el convertidor resonante serie y el convertidor resonante paralelo [1][2]. Ambos convertidores se alimentan en tensión, sus interruptores controlados pueden conectarse en semipunto o en puente completo, y sus tanques resonantes constan de un inductor y un condensador conectados en serie. Sin embargo, la carga se conecta en serie con el tanque resonante en el caso del convertidor resonante serie y en paralelo con el condensador resonante en el caso del convertidor resonante paralelo, lo que establece que la rectificación sea en corriente en el primer caso y en tensión en el segundo. Como consecuencia, el filtro de salida del convertidor resonante serie consta como primer componente reactivo de un condensador en paralelo con la salida del rectificador, mientras que en el caso del convertidor resonante paralelo se dispone de un inductor en serie con la salida del rectificador.

1.3. MODELADO Y CONTROL DE CONVERTIDORES RESONANTES

En general, en un regulador conmutado la tensión de salida debe ser regulada frente a variaciones de línea y carga. Para ello, la salida del convertidor debe ser constantemente monitorizada, comparada con una tensión de referencia estable, y la señal de error resultante, convenientemente compensada, debe utilizarse para controlar la salida del convertidor.

En la mayoría de los casos, la concepción y el diseño del lazo de control en un regulador conmutado requiere de una descripción adecuada de la etapa de potencia del convertidor. En el caso de los convertidores conmutados convencionales (PWM), la promediación en el espacio de estado se ha convertido en una herramienta habitual para el análisis de los convertidores y el diseño de los lazos de control [1][2]. Esta técnica consiste en considerar que el comportamiento de las variables de estado del convertidor viene determinado fundamentalmente por la componente continua de tales señales en un periodo de conmutación (condición de bajo rizado).

Debido a la condición comentada con anterioridad, el método de la promediación en el espacio de estado no puede ser aplicado a un amplio conjunto de convertidores conmutados, entre los que se encuentran los convertidores resonantes. La principal limitación en estos convertidores se debe al comportamiento predominantemente oscilatorio que exhiben los circuitos resonantes, con formas de onda generalmente senoidales en el circuito tanque.

Durante la última década, se ha trabajado intensamente en la búsqueda de métodos de análisis y modelado de convertidores resonantes. La literatura específica muestra una amplia gama de métodos, que pueden clasificarse en métodos que permiten derivar las propiedades en régimen estacionario de los convertidores y métodos de modelado dinámico.

De entre los métodos de estudio de convertidores de estructura resonante orientados a la caracterización en régimen estacionario de estas células de conversión cabe destacar los siguientes:

- 1) Método de la aproximación del primer armónico. Propuesto por R.L.Steigerwald en [11], se basa en considerar que la transferencia energética en el convertidor se realiza a través del primer armónico de la señal cuadrada de entrada al tanque resonante. Es un método de fácil aplicación, que proporciona resultados aceptables cuando la frecuencia de funcionamiento del convertidor es cercana a la frecuencia de resonancia y el factor de calidad de la red resonante es elevado. Por contra, sólo es aplicable si el convertidor opera en modo de conducción continua.
- 2) Método de análisis en el plano de estado. Propuesto por R.Oruganti y F.C.Lee en [14], se basa en la representación exacta en el plano de fase de las ecuaciones de estado del convertidor. Es un método válido tanto en modo de conducción continua como en discontinua que permite deducir las propiedades en régimen permanente del convertidor, mediante la resolución por métodos numéricos de un conjunto de ecuaciones no lineales obtenidas a partir de la representación en el plano de fase de las trayectorias en régimen estacionario del convertidor.

Por otra parte, los métodos encaminados a la determinación del comportamiento dinámico de los convertidores resonantes se han centrado generalmente en la consecución de modelos de pequeña señal. De entre los propuestos en la literatura específica, los métodos de modelado discreto [17][18] y los métodos basados en las funciones descriptivas extendidas [20][21] han sido los más utilizados. No obstante, la gran complejidad asociada a la aplicación de estos métodos no está en correspondencia con los resultados obtenidos, ya que la información en cuanto a estabilidad y respuesta temporal tiene sólo validez en un entorno reducido del punto de equilibrio. Además, estos estudios dejan de ser realistas no sólo en el arranque del sistema, sino cuando se produce una gran variación en la entrada o en la carga del convertidor. Por todo ello, un objetivo fundamental en el campo de los convertidores resonantes debe ser la obtención de modelos en gran señal que proporcionen un conocimiento

preciso del comportamiento de estos sistemas, y al mismo tiempo sean herramientas útiles que permitan diseñar sus lazos de control.

En relación al control de los convertidores de estructura resonante, la técnica clásica es el control en frecuencia [4][5]. Esta técnica de control, basada en la gran dependencia con la frecuencia de la función de transferencia del circuito tanque, consiste en modificar la frecuencia de conmutación cuando se detecta una desviación del valor deseado de referencia en la salida del convertidor, lo que se traduce en una variación del desfase entre la tensión y la corriente de entrada al tanque resonante de acuerdo con las necesidades de potencia en la salida.

El control en frecuencia implica la operación del convertidor a frecuencia variable, lo que origina los siguientes inconvenientes: un amplio e impredecible espectro de ruido, causando dificultad en el control de las interferencias electromagnéticas; mayor dificultad en el filtrado del rizado de la tensión de salida; y, una pobre utilización de los componentes magnéticos [4]. Asimismo, la tensión de salida en régimen estacionario depende fuertemente de las condiciones de la entrada y de la carga, lo que implica que la regulación de estos convertidores resulte muy difícil cuando existen grandes variaciones en la carga y/o en la tensión de entrada [34].

Para superar estas limitaciones se han propuesto diferentes técnicas de control [4][8][9][10], basadas en el funcionamiento del convertidor a frecuencia constante, entre las que cabe destacar por su gran aceptación el control de fase (*Phase Shift Modulation*). Esta técnica de control se utiliza generalmente en convertidores resonantes con estructura de entrada en puente completo, y consiste en aplicar un cierto desfase en las señales de excitación de las dos ramas del puente de interruptores, lo que produce la aparición de intervalos de tensión nula en la señal bipolar de entrada del circuito resonante. La regulación de la potencia en la carga se realiza mediante el control de la duración de estos intervalos a tensión nula, de forma que a mayor duración menor energía se transfiere hacia la carga, y viceversa. El interés de esta técnica de control y de sus posibles variantes queda sobradamente demostrado por la aparición en el mercado de circuitos integrados que a partir de un controlador clásico PWM realizan la activación del puente de interruptores siguiendo la estrategia del desplazamiento de fase comentada con anterioridad.

Como alternativa al control de fase, G.B.Joung, C.T.Rim y G.H.Cho proponen una nueva técnica de control que consiste en realizar la transferencia energética entre la fuente y el tanque resonante durante múltiplos enteros de un semiperiodo de la frecuencia de resonancia (*Integral Cycle Control*) [34]. Para ello, los interruptores del puente de entrada operan a una frecuencia fija que coincide con la frecuencia de resonancia del tanque, y actúan de forma que cuando se desea transferir energía al circuito la tensión y la corriente de entrada a la red resonante se encuentran en fase (modo de energización), mientras que en caso contrario, la señal que es directamente controlada por la salida del puente de interruptores es puesta a cero, y como consecuencia, la fuente no entrega energía al circuito resonante (modo de desenergización).

Inicialmente, esta estrategia de control de los interruptores es aplicada a un convertidor resonante serie (esto es, un convertidor con tanque resonante constituido por un inductor y un condensador en serie, y la carga conectada también en serie), en el que la tensión de salida deseada es seleccionada mediante la inserción de un número entero de modos de energización en un ciclo de control [34][35]. En un trabajo posterior, y utilizando de nuevo un control en lazo abierto, la nueva técnica de control de los interruptores es aplicada al convertidor dual del convertidor resonante serie (es decir, un convertidor con tanque resonante constituido por un inductor y una bobina en paralelo, y la carga conectada también en paralelo)

[36]. Estos convertidores de estructura resonante que operan a frecuencia de resonancia y en los que el transvase energético se realiza en forma de paquetes de energía de duración discreta son denominados convertidores *Quantum*: convertidor resonante serie (QSRC) y convertidor resonante paralelo (QPRC).

Los trabajos mencionados con anterioridad ponen de manifiesto la viabilidad de la utilización del nuevo método de control de los interruptores (*Integral Cycle Control*), y, proporcionan las principales características de los convertidores de estructura resonante que lo utilizan (convertidores *Quantum*), las cuales pueden resumirse en los siguientes puntos:

- 1) Operación a frecuencia fija e igual a la frecuencia de resonancia, lo que provoca la aparición de formas de onda perfectamente senoidales en el circuito resonante, y como consecuencia, se reduce el espectro de ruido EMI.
- 2) Conmutación de todos los dispositivos de potencia a tensión o corriente nula, con la consiguiente reducción de las pérdidas de conmutación hasta niveles prácticamente despreciables y, por tanto, consiguiéndose una mejora de la eficiencia y una reducción del tamaño de los equipos.
- 3) Comportamiento en régimen estacionario con baja sensibilidad frente a variaciones en la carga y en los parámetros del sistema, mientras el convertidor trabaje en modo de conducción continua.

No obstante, el hecho de que la acción sobre los interruptores se realice exclusivamente al inicio de determinados ciclos enteros de la frecuencia de resonancia provoca que la frecuencia efectiva de funcionamiento del convertidor disminuya drásticamente, lo que se traduce en una reducción importante de la velocidad de respuesta del sistema y en la aparición de un severo rizado en la tensión de salida. Asimismo, otro demérito destacable del esquema de control es que la tensión de salida únicamente puede tomar ciertos valores discretos, imposibilitando la utilización práctica de estos sistemas en un amplio abanico de aplicaciones.

Para eliminar estos inconvenientes es necesario utilizar un esquema de control en lazo cerrado que realice la transferencia energética en el convertidor de acuerdo con la estrategia de acción sobre los interruptores comentada con anterioridad y cuya concepción esté basada en una técnica de control adecuada. Con este fin, un importante número de trabajos han sido publicados en la literatura específica, entre los que cabe destacar los que se basan en la utilización de controladores predictivos, [37] a [41].

Todos estos trabajos toman como topología resonante básica un convertidor resonante serie en puente completo, si bien la utilización de la técnica de control que proponen podría extenderse a otras estructuras resonantes. El principio de funcionamiento de los lazos de control se basa en seleccionar el próximo modo de operación (modo de energización o desenergización) a partir de un método de estimación basado en la minimización del error de una determinada variable del convertidor.

Tomando como punto de partida la minimización del error de la tensión de salida, los primeros trabajos proponen controladores en modo tensión, que proporcionan una rápida respuesta transitoria y una tensión de salida continua con un pequeño rizado; sin embargo, en este caso, la corriente de entrada al convertidor presenta un rizado elevado, ya que la dinámica de la corriente resonante es mucho más rápida que la de la tensión de salida, lo que produce un excesivo estrés sobre los interruptores y sobre los elementos del tanque resonante, que debido

al necesario sobredimensionado de los mismos dará lugar a la selección de componentes de mayor tamaño y coste.

El anterior inconveniente puede ser solucionado con la utilización de controladores predictivos en modo corriente, que se basan en la minimización del error del valor medio de la corriente resonante rectificada. Los controladores en corriente requieren de un lazo de control en tensión que genere el valor de la corriente de referencia que garantiza que la tensión de salida tomará el valor deseado, y de un lazo de corriente que es el encargado de proporcionar las señales de mando a los interruptores mediante la estimación del modo de operación necesario para el próximo semiperiodo de la frecuencia de resonancia.

Con la utilización de controladores en modo corriente se consigue un control preciso de la corriente resonante y una reducción drástica del rizado de la misma, lo que se traduce en un pequeño rizado de la tensión de salida. Asimismo, estos controladores proporcionan al sistema una rápida respuesta transitoria con niveles de tensión de salida continuos.

Si bien las prestaciones de los reguladores basados en controladores predictivos pueden ser consideradas suficientemente satisfactorias, la realización práctica de los lazos de control requiere de la utilización de excesiva circuitería, lo que añade una dificultad adicional al correcto funcionamiento de los mismos. La complejidad de los lazos de control se debe a que dichos controladores requieren de un conocimiento preciso del estado y del comportamiento del sistema, y para ello, es necesario realizar el sensado de un gran número de señales y disponer de un modelo dinámico que describa de forma muy precisa la evolución de estas señales.

1.4. OBJETIVOS DE LA TESIS

Las ventajas derivadas de la utilización en los convertidores de estructura resonante de la estrategia de control de los interruptores comentada con anterioridad contrastan con la dificultad asociada a la realización práctica de la misma. Estas dificultades aparecen al intentar realizar los controladores mediante técnicas de control predictivo, [37] a [41].

El principal objetivo de este trabajo es la utilización del control en modo deslizamiento como alternativa a la implementación de la citada estrategia de control de los interruptores en los convertidores de estructura resonante. La elección de esta técnica de control se debe, fundamentalmente, a las características que proporciona al sistema: buena respuesta dinámica, robustez frente a variaciones de determinados parámetros del sistema y realización práctica sencilla.

El Capítulo 2 se dedica a la presentación de las diversas topologías resonantes que serán utilizadas a lo largo del presente trabajo, así como a la descripción del principio de funcionamiento de las mismas cuando se utiliza la estrategia de control de los interruptores comentada previamente.

En el Capítulo 3 se aborda el establecimiento de modelos no lineales de convertidores de estructura resonante. Estos modelos deben permitir el análisis y la caracterización de las células de conversión, con objeto de determinar las principales características de los convertidores, y al mismo tiempo, serán utilizados para introducir la técnica de control bajo estudio en estas estructuras de conversión.

El Capítulo 4 se dedica a la presentación de la técnica de control en modo deslizamiento, así como al desarrollo de métodos de diseño de controladores deslizantes que permitan diferentes estrategias de control en función del campo de aplicación de cada convertidor resonante. Asimismo, el establecimiento de métodos de diseño de controladores da paso a la aplicación de los mismos en reguladores conmutados basados en convertidores de estructura resonante, con objeto de determinar las prestaciones de diferentes reguladores que disponen de una o varias acciones de control.

El Capítulo 5 se destina a la utilización del control en modo deslizamiento en aplicaciones que requieren una referencia externa variable, como por ejemplo, onduladores resonantes, rectificadores resonantes con elevado factor de potencia y convertidores CA-CA resonantes. El establecimiento de modelos promediados en gran señal que incluyan el efecto de una referencia externa variable, da paso a la aplicación de diferentes estrategias de control adecuadas para el caso de referencias variables.

El Capítulo 6 se dedica a la presentación de los resultados obtenidos mediante la realización de prototipos experimentales y a la contrastación con los resultados de simulación (básicamente PSPICE y Simulink), con objeto de conocer las prestaciones reales que la utilización de la técnica de control en modo deslizamiento proporciona a este tipo de sistemas.

Por último, en el Capítulo 7 se exponen las conclusiones del presente trabajo y se marcan las perspectivas futuras de actuación en este área.