

Capítulo 1

Introducción

Resumen – En este capítulo se presentan algunas de las causas que han originado, en los últimos años, un creciente interés en el estudio, desarrollo y aplicación de los convertidores multinivel. De esta forma, se introduce el tema y la motivación de la presente tesis. Adicionalmente, se exponen los objetivos, el alcance y las principales aportaciones realizadas en este trabajo.

1.1. Motivación

Desde la aparición del primer dispositivo semiconductor, la evolución de la electrónica se ha convertido en una realidad incuestionable. El impacto de esta evolución en la actividad humana, tanto en el ámbito industrial como en el comercial y en el particular o doméstico, es enorme. Es una evidencia que el desarrollo de los equipos electrónicos ha cambiado de forma significativa los hábitos de conducta de las personas y ha mejorado sustancialmente la calidad y las prestaciones de los equipos, en todos los ámbitos de aplicación.

En particular, dentro de la electrónica en general, en los últimos años, la electrónica de potencia se ha convertido en una de las áreas más activas y de evolución más rápida. Ello ha venido originado por diversas razones. En primer lugar, la disminución de los costes de fabricación y un precio más asequible ha contribuido a incrementar el empleo de equipos electrónicos. El aumento del número de dispositivos electrónicos conectados a la red propicia una peor calidad de la tensión de red, a causa de la polución armónica inyectada por la electrónica. Un campo muy activo de estudio es aquel cuya finalidad es conseguir que los equipos electrónicos introduzcan el mínimo contenido armónico en la red. Por otro lado, la creciente preocupación social por el uso de combustible fósiles, por la eficiencia en el empleo de los recursos y por el medio ambiente ha propiciado un mayor interés y exigencia en que los sistemas incrementen su rendimiento, y en el empleo de energías renovables. En consecuencia,

otro campo de trabajo se halla en la conexión eficiente de energías renovables a la red eléctrica. Además, conforme se produce la evolución técnica, existe una creciente demanda de convertidores de mayor potencia. Si se tiene en cuenta que la electrónica de potencia es, esencialmente, una electrónica de sistemas de alimentación, resulta obvio que se halla implicada en grado máximo en los anteriores objetivos.

La consecución de los objetivos mencionados en el párrafo anterior constituye un reto en el ámbito de la electrónica de potencia, y ha contribuido a la aparición de nuevos dispositivos semiconductores, estrategias de conmutación y control, y nuevas topologías como, por ejemplo, los convertidores multinivel. Por su constitución, los convertidores multinivel presentan unas características adecuadas para intentar alcanzar los anteriores objetivos, especialmente en el área de aplicaciones de alta potencia.

En primer lugar, ya se ha comentado la necesidad de convertidores de mayor potencia, lo que conduce inevitablemente a un incremento de la tensión y/o corriente en el convertidor y, por tanto, en los dispositivos semiconductores del convertidor. Si la tensión (corriente) que debe bloquear (conducir) el dispositivo supera su valor máximo admisible, una posible solución consiste en posible recurrir a la asociación serie (paralelo) de dispositivos para alcanzar el valor de tensión (corriente) deseado. No obstante, las asociaciones de dispositivos semiconductores conllevan el problema del equilibrado estático y dinámico de tensiones y corrientes, limitando esta solución a la asociación de unos pocos dispositivos. Los convertidores multinivel resuelven este inconveniente. Con estas topologías, son las estructuras las que se conectan en serie, garantizando la distribución de las tensiones, y eliminando el problema de los equilibrados entre semiconductores. De esta característica, se advierte que los convertidores multinivel alcanzan mayor potencia que los convertidores convencionales al incrementar la tensión de operación. Es preferible un aumento de la potencia mediante un incremento de la tensión, puesto que mayores corrientes implican mayores pérdidas y menor rendimiento.

Por otro lado, en comparación con los convertidores convencionales de dos niveles y considerando un nivel de potencia equivalente, los convertidores multinivel pueden presentar un contenido armónico inferior. Incluso se podría conseguir una distorsión armónica nula si el número de niveles de tensión continua de entrada fuese infinito. En consecuencia, puede reducirse el tamaño, peso y coste de los filtros, así como la frecuencia de conmutación de los dispositivos. La reducción del tamaño de los filtros conlleva una respuesta dinámica más rápida, lo que supone un interesante valor añadido.

Entre los diferentes convertidores multinivel, la topología *Diode-Clamped* es, sin duda, la más utilizada y estudiada. Para el caso particular de tres niveles, la topología *Diode-Clamped* se denomina *Neutral-Point-Clamped* (NPC), siendo esta la topología multinivel pionera y la más atractiva puesto que, en general, el compromiso óptimo entre ventajas e inconvenientes se consigue para tres niveles. Por esta razón, la presente tesis se ha centrado en esta topología.

Sobre esta topología, las líneas de investigación enfocan su atención en el equilibrado del punto medio del bus de continua, el diseño e implementación de estrategias de conmutación y técnicas de control efectivas.

1.2. Objetivos y alcance

Los objetivos de esta tesis se pueden resumir como sigue:

- Obtener una panorámica extensa del estado actual del arte en convertidores multinivel.
- Proponer una metodología de modelado basada en funciones de conmutación de fase, apta para cualquier convertidor CC/CA, al margen de su topología, número de niveles, filtro o carga.
- Emplear la anterior metodología para modelar aquellos sistemas que se consideren oportunos para su implementación en la tesis.
- Diseñar una estrategia de conmutación, compatible con el modelado previamente realizado y la técnica de control LQR (*Linear Quadratic Regulator*), lo más simple posible y que no asuma el control de ninguna variable del sistema.
- Estudiar, analizar y caracterizar la estrategia de conmutación propuesta, comparándola con otras estrategias conocidas.
- Proponer un controlador LQR, eventualmente en combinación con programación de ganancia (*Gain Scheduling*), que asuma el control completo del convertidor NPC, independientemente de la estrategia de conmutación.
- Proponer una metodología de diseño del anterior controlador basada en modelos precisos de simulación.
- Diseñar diferentes controladores para el convertidor NPC bajo diferentes condiciones de operación, empleando la metodología anterior.
- Simular el sistema completo.
- Implementar físicamente el sistema, verificar experimentalmente la eficacia del controlador propuesto y comprobar la congruencia entre simulaciones y resultados experimentales.

1.3. Estructura de la tesis y aportaciones

En este apartado se detalla la estructura de la presente tesis, indicando el contenido de cada capítulo y las aportaciones más importantes realizadas.

- Capítulo 2. Estado de la técnica en convertidores CC/CA multinivel

En este capítulo se muestra una panorámica general sobre el estado actual de la técnica en conversión multinivel. Se destacan las ventajas de los convertidores multinivel sobre los convertidores convencionales de dos niveles. Se presentan y describen diferentes topologías, estrategias de conmutación y leyes de control empleadas en conversión multinivel y documentadas en la literatura, prestando especial atención al equilibrado de las capacidades del bus de continua en aquellas topologías que lo requieran. El capítulo finaliza con la descripción de algunas aplicaciones de los convertidores multinivel.

- Capítulo 3. Modelado del convertidor CC/CA multinivel

En este capítulo se presentan unas consideraciones generales sobre el modelado y se propone una metodología o proceso de modelado, aplicable a cualquier tipo de convertidor CC/CA, sea cual sea su topología, su número de niveles, el filtro empleado o la carga conectada. La metodología propuesta se ha empleado sobre el convertidor sobre el cual se centra la tesis, *Neutral-Point-Clamped* (NPC), considerando diferentes filtros, cargas y aplicaciones. Se remarca especialmente que el proceso de modelado se muestra válido para cualquier número de niveles, aunque la complejidad del modelo se incrementa notablemente conforme aumenta el número de niveles. Para ilustrar las posibilidades del proceso de modelado, se obtiene el modelo de un convertidor *Diode-Clamped* de N niveles. El proceso de modelado o la sistematización de la metodología propuesta no pueden considerarse aportaciones de esta tesis. En cambio, algunos de los modelos presentados en este capítulo, resultado de la aplicación de la metodología de modelado y del uso de funciones de conmutación de fase, son originales y constituyen contribuciones de esta tesis.

- Capítulo 4. Estrategia de conmutación para el convertidor CC/CA de tres niveles

En el Capítulo 4 se presenta una estrategia de conmutación para el convertidor NPC, extensión de la modulación PWM senoidal de dos a tres niveles. Considerando que las entradas de la estrategia de conmutación son las relaciones de conducción de fase en el dominio D-Q procedentes del controlador, la estrategia propuesta es original y supone una contribución de esta tesis. La estrategia realizada es simple, y no asume el control de ninguna variable del

convertidor, con el objetivo de verificar la eficacia del regulador planteado en el siguiente capítulo.

Se ha realizado un análisis de la modulación propuesta, donde se ha determinado la ganancia de la estrategia, los límites de las relaciones de conducción en el dominio D-Q para el trabajo en zona lineal y las expresiones de la tensión de salida del convertidor en función de dichas relaciones de conducción y de las tensiones del bus de continua. Además, se ha estudiado la influencia de las relaciones de conducción a secuencia cero, que depende del estado de la conexión del neutro de la carga (aislado o no).

Para finalizar este capítulo, se ha efectuado un análisis comparativo de la estrategia propuesta frente a la conocida estrategia de conmutación SVM.

- Capítulo 5. Controlador multivariable para el convertidor CC/CA de tres niveles

En el Capítulo 5 se propone un controlador para el convertidor NPC, basado en la ley de control lineal multivariable LQR (*Linear Quadratic Regulator*), que puede ser complementada con la técnica de control adaptativo programación de ganancia (*Gain Scheduling*). Esta propuesta constituye la principal aportación original de esta tesis. El regulador propuesto asume el control completo del convertidor, incluido el equilibrado del bus de continua, al margen de la estrategia de conmutación empleada. Se presenta, además, una metodología general para el diseño del regulador. Con ella, se realiza el diseño de diferentes controladores para el convertidor NPC: control de tensión de carga, control de corriente, control de tensión con carga no lineal y control para conexión a red del convertidor. El capítulo concluye apuntando las ideas clave de la acción del controlador para mantener equilibrado el bus de continua.

- Capítulo 6. Entorno de simulación y equipo experimental

En este capítulo se describe el entorno de simulación, programación del control y el equipo experimental empleados en esta tesis. Se justifica la elección de MatLab-Simulink como entorno de simulación y programación, según los requerimientos necesarios. Además, se describen los tres distintos modelos de simulación empleados en la tesis y se comparan sus resultados atendiendo a su precisión y velocidad de simulación. Esta comparación valida los modelos originales desarrollados en el Capítulo 3, y puede considerarse una aportación secundaria de la tesis. Finalmente, se describe el equipo experimental desarrollado y construido específicamente para esta tesis, con todos sus elementos: Convertidor NPC, filtros, cargas y DSP sobre plataforma PC.

- Capítulo 7. Simulación y verificación experimental

Este capítulo se dedica exclusivamente a corroborar experimentalmente la eficacia del controlador propuesto. Para ello, se ha experimentado el funcionamiento de convertidor NPC bajo diferentes sistemas físicos (filtro LC + carga resistiva, filtro LC + puente rectificador, filtro L + red). También se ha experimentado el convertidor bajo distintas exigencias de control, lo que supone aplicar diferentes controladores (control de tensión, control de corriente, control del factor de potencia y de la tensión total del bus de continua). Además, en todo momento, el controlador debe mantener el equilibrio del bus de continua. En paralelo, se simula el convertidor NPC bajo las mismas condiciones experimentadas, con objeto de comparar simulaciones y resultados experimentales y comprobar la precisión de los modelos de simulación empleados. Adicionalmente, se realiza un análisis armónico de alguna de las variables más significativas. El trabajo desarrollado en este capítulo constituye una aportación original de esta tesis.

Finalmente, se incluye un capítulo con las conclusiones de la tesis y futuras líneas de investigación que se derivan del trabajo realizado. También se incorporan diversos apéndices que permiten complementar algunos de los temas tratados en la tesis.