

Capítulo 8

Conclusiones y

Futuras Líneas de Investigación

Resumen – En este capítulo se presentan las conclusiones de la tesis presentada, las principales aportaciones realizadas y algunas de las futuras líneas de investigación que se derivan del presente trabajo.

8.1. Conclusiones

A continuación, se presentan las conclusiones más importantes que se extraen de la presente tesis doctoral:

- El análisis del estado actual de la técnica permite afirmar que las técnicas de conversión multinivel se han consolidado como una opción competitiva para la conversión de energía en el rango de media-alta potencia y que presentan un gran potencial para una más amplia aplicación en el futuro.
- Si en el modelado de convertidores se emplean funciones de conmutación de fase (*line* o *phase switching functions*), el modelo obtenido ofrece más información que utilizando funciones de conmutación de línea (*line-to-line switching functions*).
- La metodología de modelado propuesta es aplicable a cualquier tipo de convertidor CC/CA, independientemente de su topología, su número de niveles, el filtro empleado o la carga conectada. No obstante, la complejidad del modelo del convertidor se incrementa notablemente conforme aumenta el número de niveles.
- La estrategia de conmutación propuesta para el convertidor NPC se puede entender como la extensión de la modulación PWM senoidal de dos a tres niveles. La estrategia es simple, no asume el control de ninguna variable del convertidor y otorga gran capacidad de control al regulador. Esta modulación dispone de la capacidad de regular la tensión a secuencia cero mediante las relaciones de conducción a secuencia cero.

-
- En comparación con la estrategia SVM, la modulación propuesta puede alcanzar la misma ganancia, presenta una capacidad de regulación de la secuencia cero más eficaz, simple e intuitiva, pero su distorsión armónica es mayor.
 - El control lineal multivariable LQR (*Linear Quadratic Regulator*) presenta una gran libertad de diseño y entrega una ley de control de bajo coste computacional. Además, es un control muy robusto, propiedad que le otorga gran efectividad en plantas de comportamiento no lineal. Por otro lado, es posible su implementación en sistemas de control digital. Aunque el control LQR es esencialmente proporcional, es necesaria la incorporación de acción integral para cancelar posibles errores estacionarios en aquellas variables que se considere necesarias.
 - La determinación de los pesos de la función de coste de la ley de control LQR requiere realizar una serie de simulaciones. El número de simulaciones depende fuertemente del conocimiento que se disponga sobre la planta. En el diseño del controlador, debe verificarse que tanto las variables de estado como las acciones de control toman valores dentro de sus márgenes admisibles, en todo momento.
 - El uso de la programación de ganancia (*Gain Scheduling*) puede resultar útil como complemento a la técnica LQR, en aquellos casos en que se requiere aplicar diferentes controladores a una misma planta o cuando el comportamiento no lineal de la planta no admite un único controlador lineal.
 - El entorno de simulación y programación (MatLab-Simulink) destaca por su facilidad de uso y su versatilidad. Puesto que el DSP empleado para la implementación del control admite su programación desde MatLab-Simulink, los ficheros fuente de simulación pueden utilizarse, con pequeños cambios, como ficheros fuente de programación del control. Esta posibilidad facilita mucho el trabajo del diseñador y reduce considerablemente los tiempos de desarrollo de un nuevo control.
 - En la simulación del sistema completo y cálculo del controlador, resulta clave la elección del modelo del convertidor. Los modelos promediados en el dominio D-Q ofrecen excelentes resultados, pero no contienen información de alta frecuencia. Por otro lado, los modelos con componentes detallados, muy precisos, ralentizan la simulación de forma importante. El compromiso óptimo entre velocidad de simulación y precisión se obtiene con los modelos matemáticos que emplean las funciones de conmutación del convertidor.
 - Los resultados experimentales validan el controlador LQR propuesto, obteniéndose buenas prestaciones, tanto en régimen permanente como en procesos transitorios, frente a cambio de parámetros e incluso con carga no lineal.
 - Junto con el controlador LQR, el uso de programación de ganancia se ha mostrado efectivo, en concreto en la limitación de sobrecorrientes en los sistemas experimentados.
 - El análisis de los contenidos armónicos experimentales revela que la distorsión armónica es mínima si el sistema es lineal y que se incrementa cuanto mayor sea el tiempo que emplea el DSP en ejecutar la rutina de control. Por otro lado, con carga no lineal, se deforman significativamente corrientes y tensiones, aunque el controlador continua cumpliendo eficazmente su tarea.

- El tiempo que emplea el DSP en ejecutar la rutina de control es algo elevado. Para mejorar el comportamiento del control es conveniente reducir dicho tiempo.

8.2. Aportaciones de la tesis

Seguidamente, se resaltan las principales aportaciones realizadas en este trabajo de investigación.

En el Capítulo 3, los modelos obtenidos para los sistemas con conexión entre el punto medio del bus de continua y el neutro de la carga, desarrollados mediante la metodología propuesta y el empleo de funciones de conmutación de fase, son originales.

Los Capítulos 4 y 5 constituyen el núcleo central de las aportaciones realizadas. En el Capítulo 4, se propone una estrategia de conmutación PWM que permite accionar los interruptores del convertidor a partir de las relaciones de conducción de fase en el dominio D-Q procedentes del controlador, sobre la base de los modelos desarrollados. La estrategia es simple y no regula ninguna variable del sistema. En esta tesis, el controlador se encarga de regular todas las variables del sistema, incluido el equilibrio del bus de continua. Bajo este punto de vista, la estrategia de conmutación puede entenderse como una extensión del controlador. Este es un enfoque diferente del convencional, donde el equilibrio del bus de continua se consigue mediante la elección adecuada de los estados redundantes del convertidor en la estrategia de conmutación, mientras que el resto de variables se regulan a través del controlador.

Se ha efectuado un interesante análisis de la influencia de las relaciones de conducción a secuencia cero en la modulación, lo que constituye una aportación significativa, puesto que, en general, las estrategias documentadas en la literatura no consideran la secuencia cero. En particular, la modulación presentada dispone de la capacidad inherente de regular la tensión a secuencia cero mediante las relaciones de conducción a secuencia cero. Esta característica permite regular el retorno de corriente por el neutro en sistemas con neutro no aislado y otorga grados de libertad a la modulación en sistemas de neutro aislado, que pueden emplearse, por ejemplo, en incrementar la ganancia de la modulación.

En el Capítulo 5, se ha diseñado un controlador con la técnica de control lineal multivariable LQR (*Linear Quadratic Regulator*), complementado con la técnica de control no lineal adaptativo programación de ganancia (*Gain Scheduling*). Se propone, además, una metodología de cálculo del controlador, como soporte al diseñador, puesto que existen infinitos grados de libertad en el diseño y deberá ser el diseñador quien, con su conocimiento de la planta, establezca los criterios definitivos para calcular el controlador.

La versatilidad inherente de la técnica de control multivariable LQR se amplía con el empleo adicional de la programación de ganancia. Para cada aplicación, pueden diseñarse y aplicarse tantos controladores LQR multivariable como sea necesario para alcanzar el control deseado, sin límite en su número. El control propuesto es, por tanto, versátil, abierto y adaptable. En cualquier caso, el controlador puede ser adaptado a las necesidades concretas de cada aplicación. Por ello, se ha aplicado la metodología de cálculo del controlador a diferentes sistemas (convertidor NPC + filtro LC + carga R, NPC + filtro LC + puente rectificador, NPC + filtro L + red) y bajo distintas condiciones de operación (control de tensión, control de corriente, control de potencia y factor de potencia).

En el Capítulo 6 se ha descrito el entorno de simulación y el equipo experimental. Se ha efectuado una interesante comparación entre tres modelos distintos de simulación del convertidor NPC, desde la perspectiva de velocidad de simulación y precisión que ofrece cada modelo, que constituye una aportación menor de la tesis. Los modelos matemáticos que emplean las funciones de conmutación del convertidor son aquellos que ofrecen un mejor compromiso entre velocidad de simulación y precisión. Por otro lado, el desarrollo y construcción del equipo experimental ha constituido el punto de partida de la línea de trabajo sobre convertidores multinivel en el Laboratorio de Convertidores del GREP.

En el Capítulo 7 se muestra el trabajo original experimental que verifica la efectividad del control propuesto para el convertidor NPC. El controlador se ha mostrado aplicable, útil y eficaz en la regulación de las distintas cargas y aplicaciones experimentadas, bajo diferentes y variadas condiciones de trabajo y variables a controlar. En régimen permanente, se alcanza error estacionario nulo. En procesos transitorios, el tiempo de respuesta puede ser muy rápido y en disposición de competir con otros sistemas de control publicados. Además, la calidad de la respuesta transitoria es buena, con bajo tiempo de establecimiento, sin rebasamiento ni oscilaciones. Es especialmente interesante el excelente control conseguido del equilibrio del bus de continua. Así mismo, se observa una buena robustez frente a cambio de parámetros en el sistema, lo que permite alcanzar el régimen permanente deseado aunque diferentes parámetros del sistema presenten desviaciones significativas respecto los valores esperados. El controlador se ha verificado efectivo incluso con carga no lineal, donde las formas de onda de tensiones y corrientes se deforman significativamente.

Se ha verificado la utilidad del empleo de programación de ganancia junto con la técnica LQR. Su uso se ha mostrado muy efectivo en el control de sobrecorrientes, sin provocar inestabilidad en el sistema ni salidas fuera de límites en las variables de control del sistema (relaciones de conducción).

Adicionalmente, se ha comprobado la congruencia entre las simulaciones realizadas y los resultados experimentales obtenidos, en todos los ensayos efectuados. Esta coincidencia valida los modelos de simulación empleados y puede afirmarse que se aproximan apropiadamente al

sistema real. Además, se confirma la validez del proceso de diseño del controlador mediante simulación.

8.3. Futuras líneas de investigación

Cualquier trabajo de investigación desarrollado con un mínimo de entusiasmo contribuye a despejar algunas incógnitas sobre el tema tratado pero, de forma simultánea, genera nuevas preguntas, nuevas ideas y/o abre nuevas vías de trabajo. En este apartado se presentan algunas líneas de investigación que pueden ser objeto de interés, atendiendo al trabajo expuesto en la presente tesis.

En relación con el modelado de sistemas, la metodología descrita puede aplicarse a todo tipo de aplicaciones. En consecuencia, puede ser interesante obtener los modelos de otras aplicaciones aparte de las desarrolladas en esta tesis. Por ejemplo, accionamientos de motores de alterna o convertidores CA/CC/CA (*back-to-back*).

Otra posible e interesante línea de trabajo consiste en desarrollar los modelos de los convertidores en el supuesto que el sistema trifásico esté desequilibrado y/o con carga trifásica desequilibrada.

Respecto a la estrategia de conmutación, la descripción realizada en esta tesis engloba la zona lineal. Puede ser interesante en extender la estrategia más allá de esta zona, y efectuar un estudio detallado de su funcionamiento en la zona de sobremodulación. Otro posible punto de interés consiste en extender la modulación propuesta a convertidores de N niveles.

Partiendo de la base que, en sistemas de neutro aislado, las relaciones de conducción a secuencia cero suponen grados de libertad en la estrategia de conmutación propuesta, sería conveniente obtener un algoritmo de optimización para la elección de dichas relaciones de conducción, en función de las características deseadas en la modulación.

Puesto que la estrategia propuesta presenta un espectro armónico más desfavorable que la estrategia SVM, sería conveniente estudiar la posibilidad de redistribuir las funciones de conmutación en cada periodo de conmutación de acuerdo con la información del diagrama SVM, con objeto de seleccionar vectores de estado más próximos al vector de modulación y, en consecuencia, reducir el número de conmutaciones por periodo y los contenidos armónicos de alta frecuencia. O bien estudiar la posibilidad de, a partir de las relaciones de conducción en el dominio D-Q que entrega el controlador, emplear otras estrategias de conmutación.

En referencia al controlador propuesto, sería interesante mejorar la metodología de diseño, de forma que un diseñador inexperto o sin conocimientos de la planta pudiese obtener el mejor

controlador posible con una dedicación razonable de tiempo. El caso óptimo sería aquel donde todo el proceso de diseño estuviese totalmente automatizado.

Por otro lado, parece factible extraer mayor rendimiento de la programación de ganancia, para conseguir un control adaptativo que permita abarcar la máxima variabilidad posible en los parámetros del sistema, de forma que el control aplique, automáticamente, el regulador más apropiado para el punto de funcionamiento del sistema, en cualquier condición de operación.

Puede ser útil extender el control propuesto a otras aplicaciones, por ejemplo, el control de motores de alterna, generadores eólicos, a convertidores de N niveles y/u otras topologías diferentes de la NPC.