

## **CAPÍTULO 7**

### **7. CONCLUSIONES**

7.1. INTRODUCCIÓN

7.2. CONCLUSIONES PARTICULARES

7.3. CONCLUSIONES GENERALES

7.4. APORTACIONES DEL TRABAJO DE TESIS

7.5. PROPUESTA DE TRABAJOS FUTUROS

## CAPÍTULO 7

### 7. Conclusiones

En este capítulo se presentan las conclusiones de la tesis doctoral, las principales aportaciones realizadas y algunas líneas de investigación futuras para la continuación de este trabajo de investigación.

#### 7.1. Introducción

El objetivo de esta tesis es realizar el análisis y la síntesis de inversores bidireccionales con aislamiento en alta frecuencia. Entre las aplicaciones que se contemplan podemos destacar: sistemas de alimentación fotovoltaicos, sistemas de alimentación utilizando celdas de combustible, mini-generadores eólicos, compensación armónica. Hay dos grandes requerimientos para varias de estas aplicaciones. En primer lugar, es necesario proporcionar aislamiento eléctrico entre la fuente de corriente continua y la carga de corriente alterna, principalmente por temas de seguridad, y en segundo lugar algunas aplicaciones requieren almacenamiento de energía en el lado de corriente continua. En algunas de estas aplicaciones se utilizan baterías como medio de almacenamiento de energía.

El transformador que proporciona el aislamiento eléctrico, debe ser de pequeño volumen y bajo coste. La tendencia en inversores de potencia con aislamiento es introducir un transformador funcionando en alta frecuencia, de tal forma que la alta frecuencia de funcionamiento incida en una alta densidad de potencia, manteniendo limitadas las pérdidas en el núcleo.

Las baterías o fuente equivalente entregan una tensión de corriente continua que, a través del inversor, se convierte en tensión de corriente alterna que alimenta cargas de diferentes tipos. Si existe energía reactiva debido a una carga altamente inductiva o capacitiva, es interesante que esta energía sea devuelta a la fuente de alimentación, en nuestro caso a las baterías, de tal forma que se elimina la necesidad de tener un condensador de gran capacidad intermedio entre el bus de cc de baterías y la carga de ca.

Asimismo, las baterías se pueden cargar desde el lado de corriente alterna a través de un grupo electrógeno o a través de la línea de corriente alterna. De esta forma se tiene,

mediante un solo convertidor, la capacidad de entregar energía de las baterías o bien recibirla.

Debe haber una alta calidad en la forma de onda de la tensión que se entrega ya sea a sistemas aislados o a la línea de corriente alterna. Para contribuir a mejorar la calidad de la tensión de salida del inversor, se exploran en las topologías del tipo multinivel que presentan una baja distorsión armónica de la tensión de salida, y además permiten la reducción drástica del tamaño del filtro de salida y, a través del conveniente manejo de tensiones, impactar en el aumento del rendimiento total de los inversores.

La metodología de trabajo que se sigue durante la realización de esta tesis doctoral se resume en los siguientes puntos:

- Propuesta de una metodología para el análisis y síntesis de inversores bidireccionales con aislamiento en alta frecuencia.
- Aplicación de la metodología propuesta a inversores bidireccionales con aislamiento en alta frecuencia de dos niveles, que se toman como punto de partida para después extender la metodología a inversores bidireccionales multinivel.
- Propuesta de un nuevo inversor bidireccional multinivel con aislamiento en alta frecuencia basado en las topologías puente completo/medio puente. Aplicación de la metodología para el análisis del inversor multinivel.
- Propuesta de un nuevo inversor bidireccional multinivel con aislamiento en alta frecuencia basado en las topologías *push-pull*/puente completo. Aplicación de la metodología propuesta para el análisis del inversor multinivel.
- Presentación de resultados de simulación de las estrategias de modulación empleadas para inversores de dos niveles y multinivel en lazo abierto y en lazo cerrado. Presentación de los criterios de diseño para la realización de los inversores. Presentación de los resultados experimentales de los inversores bidireccionales con aislamiento en alta frecuencia. Los resultados experimentales incluyen: formas de onda de trabajo en lazo abierto y en lazo cerrado, datos de distorsión armónica total de la tensión antes del filtro de salida pasabajos, datos de rendimiento y valoración de los resultados obtenidos.
- Finalmente, se presentan las conclusiones de la tesis y se resaltan las aportaciones más importantes de este trabajo. Asimismo se presentan propuestas de trabajos futuros.

## 7.2. Conclusiones particulares

En esta tesis doctoral se propone una metodología para el análisis y síntesis de inversores bidireccionales con aislamiento en alta frecuencia de dos niveles y

multinivel. Esta metodología permite realizar de forma sistemática la realización de cualquier inversor bidireccional con aislamiento en alta frecuencia de dos niveles o multinivel de tipo directo. A continuación se resaltan algunos aspectos importantes de la metodología.

- Distinción de los diferentes bloques que conforman el inversor. Aquí se incluyen como bloques la fuente de entrada de cc y la carga de ca.
- Descripción de los aspectos más importantes de cada bloque y, en el caso de los convertidores, análisis del funcionamiento.
- Síntesis de inversores bidireccionales de dos niveles y multinivel.
- Elección de las estrategias de modulación y de conmutación.
- Procedimiento para el modelado de inversores utilizando transformación a coordenadas DQ.
- Propuesta de aplicación de técnicas de control lineal a los inversores.

La metodología propuesta se aplica a inversores bidireccionales con aislamiento en alta frecuencia de dos niveles, se abordan las siguientes topologías: puente completo/puente completo, puente completo/medio puente, *push-pull*/puente completo. La relevancia de la aplicación de la metodología a inversores de dos niveles radica en la extensión que se puede hacer de los resultados a los inversores multinivel. Asimismo, los inversores de dos niveles son un punto de partida para la valoración de las características de los inversores multinivel.

La metodología se aplica a inversores bidireccionales con aislamiento en alta frecuencia multinivel. Las dos topologías que se proponen son: inversor multinivel basado en las topologías puente completo/medio puente e inversor multinivel basado en las topologías *push-pull*/puente completo. El modo de funcionamiento de ambos es distinto; sin embargo, se pueden aplicar de forma sencilla las mismas estrategias de modulación y las mismas estrategias de conmutación. El modelado de los inversores multinivel y la propuesta de control es similar a la utilizada para inversores de dos niveles.

Los resultados de simulación presentados exponen las ventajas de trabajar con inversores multinivel y con la estrategia de modulación de los dos vectores más cercanos (distorsión armónica total de la tensión  $V_{ef}$ , 50 % menor que en los inversores de dos niveles).

Para la realización de los inversores bidireccionales de dos niveles y multinivel se utilizan módulos funcionales. Estos módulos son muy flexibles y se utilizan para obtener resultados experimentales. Sin embargo, es necesario resaltar que al ser topologías de convertidores distintas, para optimizar el funcionamiento, es necesario diseñar módulos con características diferentes. Para los ensayos experimentales se

utiliza el *dSPACE*, para realizar las estrategias de modulación y el control y una PLD para realizar las estrategias de conmutación.

Los resultados experimentales son concluyentes en las ventajas de utilizar inversores bidireccionales multinivel con aislamiento en alta frecuencia, especialmente con la utilización de la estrategia de modulación de los dos vectores más cercanos. La distorsión armónica total de la tensión  $V_{ef}$  es aproximadamente 50% menor que la distorsión armónica en inversores de dos niveles (ver tabla 6.2). Asimismo el rizado de corriente es menor en el inversor multinivel para un mismo filtro de salida pasabajos. El mayor rendimiento se obtiene al utilizar el inversor multinivel basado en las topologías *push-pull*/puente completo (ver tabla 6.3), lo cual nos indica que las pérdidas en el convertidor cc/ca son determinantes para las condiciones de prueba que se utilizaron que se pueden resumir en tensión de entrada baja y corriente de entrada elevada. El convertidor cc/ca tiene la particularidad de utilizar un único transistor en la trayectoria de corriente de entrada, además se beneficia del bajo rizado debido a la operación multinivel para disminuir las pérdidas por conmutación.

Los resultados experimentales en lazo cerrado verifican la aplicabilidad del controlador propuesto y se muestra rápido y eficaz en su funcionamiento.

### 7.3. Conclusiones generales

- Los sistemas de alimentación basados en baterías se favorecen con la utilización de los inversores bidireccionales con aislamiento en alta frecuencia. Debido principalmente a la oportunidad de utilizar un solo convertidor para realizar la entrega de potencia desde la fuente de cc hasta la carga en corriente alterna y además presentar la capacidad de tomar el lado de ca como fuente de alimentación y realizar la entrega de potencia del lado de ca hacia las baterías, permitiendo de este modo realizar la carga de las baterías.
- Los inversores bidireccionales con aislamiento en alta frecuencia eliminan la necesidad de utilizar un filtro intermedio en corriente continua, debido a la capacidad de manejar flujo de potencia bidireccional. El número de transistores utilizado puede ser el mismo que en estructuras convencionales de 3 etapas en cascada, pero se elimina la necesidad del filtro *LC* intermedio (ver tabla 6.4).
- La estrategia de modulación de vectores de estado de tensión permite modular la tensión de salida de los inversores de dos niveles y extender el concepto a inversores bidireccionales multinivel.
- La estrategia de modulación unipolar multinivel permite reducir la distorsión armónica total de la tensión de salida de los inversores bidireccionales multinivel con un mínimo número de conmutaciones en el convertidor ca/ca.

- La estrategia de modulación de los dos vectores más próximos, permite reducir la distorsión armónica total de la tensión de salida y además reducir drásticamente el tamaño del filtro de salida del inversor.

#### 7.4. Aportaciones del trabajo de tesis

Hay cuatro aportaciones centrales del trabajo de tesis:

- Propuesta de una metodología para el análisis y síntesis de inversores bidireccionales con aislamiento en alta frecuencia.
- Aplicación de la metodología a inversores bidireccionales con aislamiento en alta frecuencia de dos niveles.
- Propuesta de una nueva topología de inversor bidireccional multinivel con aislamiento en alta frecuencia basado en las topologías puente completo/medio puente. Aplicación de la metodología.
- Propuesta de una nueva topología de inversor bidireccional con aislamiento en alta frecuencia multinivel basado en las topologías *push-pull*/puente completo. Aplicación de la metodología.

Asimismo se pueden exponer otras aportaciones del trabajo de tesis:

- Aplicación de estrategias de modulación de convertidores multinivel convencionales a inversores bidireccionales con aislamiento en alta frecuencia multinivel.
- Método de generalización de estrategia de conmutación para inversores bidireccionales con aislamiento en alta frecuencia. El método propuesto permite conmutar los diferentes estados del convertidor ca/ca con un 50 % de transiciones suaves (de tensión o corriente).
- Obtención de modelo matemático promediado y en coordenadas DQ de los convertidores bidireccionales con aislamiento en alta frecuencia
- Simulación utilizando matlab/*simulink* del modelo de los inversores. Se ha verificado experimentalmente la corrección de este método de simulación.
- Aplicación del control LQR+I a inversores bidireccionales con aislamiento en alta frecuencia.
- Fabricación de convertidores de potencia de dos niveles y multinivel utilizando módulos de potencia funcionales.

#### 7.5. Propuesta de trabajos futuros

La electrónica de potencia contribuye a la eficiente utilización de energías renovables y parte de su aplicación está ligada al desarrollo de nuevas investigaciones dentro de este campo de la electrónica.

Este trabajo de tesis, da inicio a una serie de investigaciones en el campo de los inversores bidireccionales con aislamiento en alta frecuencia, de tal forma que es necesario plantear caminos a seguir para contribuir al desarrollo de convertidores y técnicas de conversión de potencia que permitan la masiva utilización de recursos renovables.

A continuación se plantean algunos trabajos a realizar como seguimiento de esta tesis.

- Investigar propuestas de inversor multinivel de alto rendimiento bidireccional con aislamiento en alta frecuencia, minimizando el número de transistores en serie con la corriente de carga, para optimizar el rendimiento.
- Exploración de circuitos de recuperación de energía.
- Exploración de circuitos recortadores (activos y pasivos) y *snubbers*.
- Experimentación de los inversores de tipo directo en modo bidireccional.
- Exploración de los inversores bidireccionales con aislamiento en alta frecuencia de modo indirecto para aplicaciones de baja potencia.