

## CAPITULO 2

### 2. METODOLOGÍA PARA EL ANÁLISIS Y SÍNTESIS DE INVERSORES BIDIRECCIONALES CON AISLAMIENTO EN ALTA FRECUENCIA DE TIPO DIRECTO

#### 2.1. REPRESENTACIÓN GENERALIZADA DE LOS INVERSORES BIDIRECCIONALES CON AISLAMIENTO EN ALTA FRECUENCIA TIPO DIRECTO

2.1.1. Tipos de fuentes de corriente continua

2.1.2. Tipos de convertidores cc/ca de alta frecuencia

2.1.2.1. *Descripción del convertidor cc/ca de alta frecuencia medio puente*

2.1.2.2. *Descripción del convertidor cc/ca de alta frecuencia puente completo*

2.1.2.3. *Descripción del convertidor cc/ca de alta frecuencia basado en la topología push-pull*

2.1.3. Descripción del transformador de alta frecuencia

2.1.4. Descripción del convertidor ca/ca

2.1.4.1. *Convertidor ca/ca medio puente con toma media*

2.1.4.2. *Convertidor ca/ca en configuración puente completo*

2.1.4.3. *Síntesis de convertidores ca/ca multinivel*

2.1.5. Filtro de salida pasabajos

2.1.6. Carga en corriente alterna

#### 2.2. INVERSORES CON AISLAMIENTO EN ALTA FRECUENCIA TIPO DIRECTO

2.2.1. Inversor con entrada medio puente y salida puente completo

2.2.2. Inversor con entrada puente completo

2.2.3. Inversor con entrada *push-pull*

2.2.4. Síntesis del inversor bidireccional con aislamiento en alta frecuencia multinivel utilizando convertidor cc/ca puente completo

2.2.5. Síntesis del inversor bidireccional con aislamiento en alta frecuencia multinivel utilizando el convertidor cc/ca *push-pull*

2.3. ESTRATEGIAS DE MODULACIÓN

2.3.1. Estrategia de modulación PWM

2.3.2. Estrategia de modulación en vectores de estado

*2.3.2.1. Modulación para convertidores de dos niveles*

*2.3.2.2. Modulación para convertidores multinivel*

2.4. ESTRATEGIA DE CONMUTACIÓN

2.5. MODELADO DE INVERSORES CON AISLAMIENTO EN ALTA FRECUENCIA

2.6. ELECCIÓN DEL SISTEMA DE CONTROL

2.7. ELECCIÓN DEL ENTORNO DE SIMULACIÓN

2.8. CONCLUSIONES

## CAPÍTULO 2

### **2. Metodología para el análisis y síntesis de inversores con aislamiento en alta frecuencia y con capacidad de flujo de potencia bidireccional tipo directo**

En este capítulo se propone una metodología para el análisis y síntesis de inversores bidireccionales con aislamiento en alta frecuencia (IBAAF) para dos niveles y multinivel.

El procedimiento que se sigue se puede resumir en los siguientes aspectos:

- a) Distinción de los diferentes bloques que conforman los IBAAF.
- b) Descripción de la topología de cada bloque y del funcionamiento.
- c) Propuesta de nuevas topologías que permitan mejorar el rendimiento global de los IBAAF.
- d) Topologías de inversores que se pueden obtener utilizando las topologías de cada bloque individual. Aquí se incluyen las topologías propuestas multinivel (IBAAF<sub>M</sub>).
- e) Elección del tipo de estrategia de modulación.
- f) Propuestas de estrategias de conmutación.
- g) Procedimiento propuesto para el modelado de los convertidores.
- h) Procedimiento para utilizar técnicas de control.
- i) Propuesta de entorno de simulación.

A continuación se expone la metodología que se seguirá en el resto de la tesis para el análisis y síntesis de IBAAF tipo directo.

#### **2.1. Representación generalizada de los inversores bidireccionales con aislamiento en alta frecuencia de tipo directo**

Los inversores con aislamiento en alta frecuencia y capacidad de flujo de potencia bidireccional tipo directo se pueden representar de forma unificada en el diagrama de bloques de la figura 2.1.



Figura 2.1. Diagrama de bloques de los inversores con aislamiento en alta frecuencia tipo directo.

Las flechas de doble dirección indican que el convertidor puede enviar energía de la fuente de corriente continua a la carga de corriente alterna, asimismo puede recibir la energía reactiva debido a cargas inductivas o capacitivas y también puede conectarse a la red eléctrica y transferir energía hacia la fuente de corriente continua.

### 2.1.1. Tipos de fuentes de corriente continua

La fuente de corriente continua que utilizan este tipo de inversores son las baterías, los diferentes esquemas de generación ya sean fotovoltaico, eólico o celdas de combustible generalmente tienen un enlace de cc con baterías para almacenamiento de energía. En el caso de las baterías de combustible existen algunas que permiten el flujo de potencia bidireccional como las desarrolladas por la NASA [58]. En el caso de sistemas fotovoltaicos conectados a red, se incluye un condensador que permite intercambiar potencia reactiva y aplicar algoritmos de búsqueda del punto de máxima potencia [59]

### 2.1.2. Tipos de convertidores cc/ca de alta frecuencia

La primera etapa de conversión consiste en tomar la señal de cc y realizar la inversión en alta frecuencia. El objetivo es conseguir alimentar al transformador con una señal que permita trabajar sin saturar el núcleo y además, al trabajar en alta frecuencia de conmutación se obtiene mayor densidad de potencia. Se pueden utilizar diferentes estructuras para generar la señal alterna de alta frecuencia.

#### 2.1.2.1. Descripción del convertidor cc/ca de alta frecuencia medio puente

El convertidor cc/ca de alta frecuencia basado en la topología medio puente se presenta en la figura 2.2. En esta topología dos condensadores del mismo valor están conectados en serie con la entrada de tensión, de tal forma que la unión de estos dos condensadores quede a la mitad del voltaje de entrada. El voltaje máximo que ve cada transistor es  $V_i$ . La tensión máxima que puede generar a la salida es la mitad de la tensión de entrada y con esta configuración es imposible generar un cero, en el caso de que exista corriente circulando por el circuito cuando ambos transistores estén apagados.

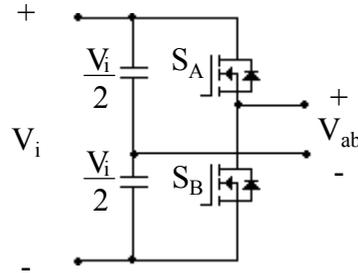


Figura 2.2. Convertidor cc/ca en medio puente.

### 2.1.2.2. Descripción del convertidor cc/ca de alta frecuencia puente completo

La figura 2.3 muestra la configuración del convertidor cc/ca puente completo. Este convertidor consta de dos ramas de transistores, con la misma tensión de entrada que el convertidor medio puente. La tensión máxima que se puede obtener a la salida del convertidor es  $V_i$ . La corriente en este convertidor se divide en dos a diferencia del convertidor medio puente por lo que es capaz de manejar mayor potencia y en caso de ser necesario necesitaría menos transistores en paralelo que la configuración medio puente. Para generar una tensión positiva en  $V_{ab}$ , es necesario activar  $S_A$  y  $S_D$ , para generar una tensión negativa en  $V_{ab}$ , es necesario activar  $S_B$  y  $S_C$ , y para generar un cero es necesario activar  $S_A$  y  $S_B$  o  $S_C$  y  $S_D$ .

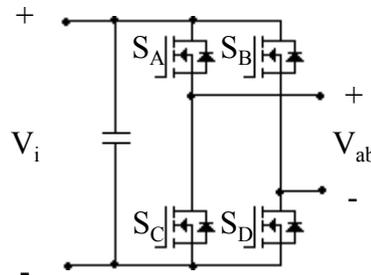


Figura 2.3. Convertidor cc/ca en puente completo.

### 2.1.2.3. Descripción del convertidor cc/ca de alta frecuencia push-pull

La figura 2.4 muestra el diagrama de circuito del convertidor *push-pull*, El principal requerimiento de este convertidor es el transformador con toma media en el primario.

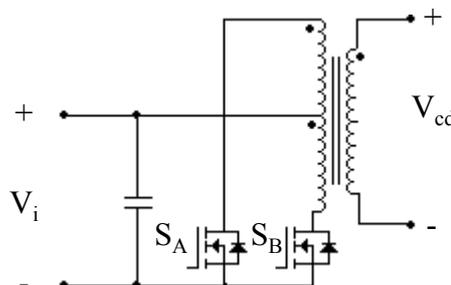


Figura 2.4. Convertidor cc/ca utilizando la configuración push-pull.

La principal ventaja que tiene este convertidor es que tiene únicamente un transistor en la trayectoria de la corriente de entrada. Esta característica es importante cuando se trabaja con tensiones de entrada bajas, como son los sistemas alimentados con paneles solares, baterías o celdas de combustible. Otra característica importante es que los dos transistores tienen la fuente conectada al mismo punto con lo cual facilita la implementación de la fuente de alimentación del circuito de activación. El aspecto más crítico de este tipo de convertidores es la inductancia de dispersión asociada al primario del transformador, debido a que en cada periodo de conmutación la corriente por cada devanado se ve interrumpida, lo cual hace necesario la utilización de circuitos de recuperación de energía.

### 2.1.3. Descripción del transformador de alta frecuencia

Uno de los aspectos más importantes en los inversores con aislamiento en alta frecuencia es el transformador. El objetivo de elevar la frecuencia de trabajo del transformador es reducir el tamaño y el coste del convertidor. Asimismo el transformador permite tener múltiples voltajes de salida y de esta forma cubre las limitaciones de algunos convertidores no aislados de elevar o reducir el voltaje. La relación de transformación,  $rt$ , se define como la razón entre el número de vueltas del secundario y el número de vueltas del primario. Las topologías que utilizan el transformador de alta frecuencia permiten trabajar el transformador sin saturarlo. El principio de trabajo se basa en excitar el primario del transformador durante un primer intervalo de trabajo y después restablecer durante el siguiente intervalo, de tal forma que el transformador no se sature. Es importante mencionar que el ciclo de trabajo de los dos intervalos no necesariamente debe tener la misma duración.

Es deseable minimizar las inductancias de dispersión del transformador. La energía asociada con estas inductancias de dispersión tiene que absorberse por los elementos de conmutación y sus *snubbers* o regresada a la fuente mediante un circuito recuperador de energía. Asimismo es necesario diseñar el transformador para que la inductancia magnetizante sea lo suficientemente grande de tal forma que la corriente magnetizante pueda ser pequeña.

Los parámetros más importantes para diseñar el transformador son: la frecuencia de conmutación,  $f_s$ , la tensión de entrada,  $V_i$ , la tensión de salida, y la potencia de entrada.

La figura 2.5 muestra el circuito equivalente de un transformador de alta frecuencia considerando los términos inductivos y despreciando los resistivos y capacitivos. Donde  $L_{dp}$  y  $L_{ds}$  son las inductancias de dispersión del primario y del secundario respectivamente, y  $L_m$  es la inductancia magnetizante referida al primario.

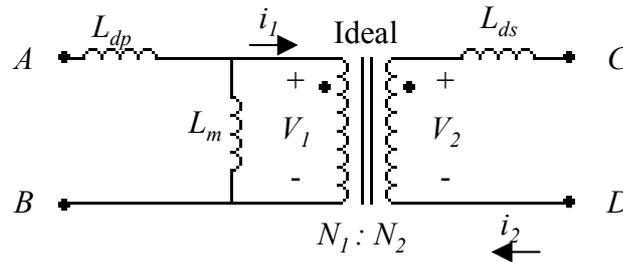


Figura 2.5. Circuito equivalente del transformador de alta frecuencia.

Se puede dividir a los convertidores con aislamiento de dos formas dependiendo de si la excitación del núcleo es unidireccional o bidireccional. En el caso de excitación unidireccional se tiene el convertidor *flyback* y el convertidor *forward* y en el caso de la excitación bidireccional se encuentran los convertidores *push-pull*, medio puente y puente completo [65].

#### 2.1.4. Descripción del convertidor ca/ca

Las dos topologías utilizadas para realizar la conversión ca/ca son el convertidor ca/ca medio puente utilizando transformador con toma media y el convertidor ca/ca en configuración puente completo. La primera topología no permite la generación del vector cero, por lo que éste se tiene que realizar utilizando el convertidor del lado del primario. El segundo es más flexible dado que permite aplicar el vector cero, además de que la corriente se reparte por dos ramas distintas teniendo de tal forma mayor capacidad de manejo de potencia, sin embargo durante la conducción siempre hay cuatro dispositivos conduciendo.

##### 2.1.4.1. Convertidor ca/ca medio puente con toma media

La figura 2.6 muestra la configuración del convertidor ca/ca bidireccional medio puente con toma media. Cada par de transistores  $S_{11}$ - $S_{12}$  y  $S_{21}$ - $S_{22}$  forman interruptores bidireccionales donde la corriente puede fluir de forma controlada en ambos sentidos y la tensión puede ser bloqueada en ambos sentidos. La tensión  $V_{ab}$  es una señal alterna de alta frecuencia la cual se eleva a través del transformador y se presenta en terminales del secundario. Esta señal se rectifica obteniendo una tensión  $V_{ef}$  que puede ser positiva o negativa.

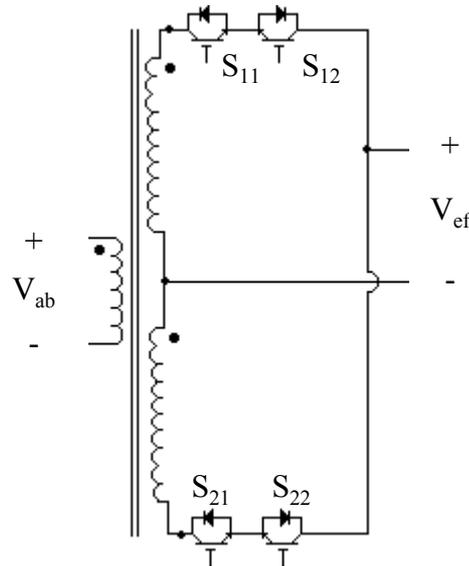


Figura 2.6. Convertidor ca/ca medio puente bidireccional.

### 2.1.4.2. Convertidor ca/ca en configuración puente completo

La figura 2.7 muestra el diagrama de circuito del convertidor ca/ca en configuración puente completo.

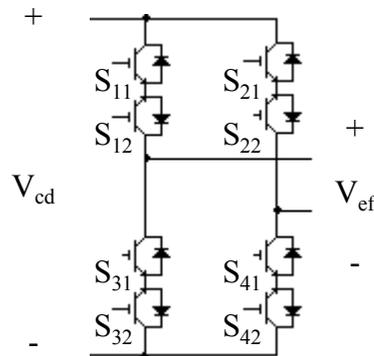


Figura 2.7. Convertidor ca/ca puente completo bidireccional.

Los pares de interruptores  $S_{11}$ - $S_{12}$ ,  $S_{21}$ - $S_{22}$ ,  $S_{31}$ - $S_{32}$  y  $S_{41}$ - $S_{42}$  forman interruptores bidireccionales en tensión y en corriente. Este convertidor presenta la ventaja de manejar mayor cantidad de corriente ya que se utilizan dos ramas de transistores, sin embargo, en cada momento conducen cuatro transistores, lo cual hace que disminuya el rendimiento. Utilizando esta topología es posible generar el vector cero.

### 2.1.4.3. Síntesis de convertidores ca/ca multinivel

Dentro de la descripción de convertidores ca/ca para aplicaciones con aislamiento en alta frecuencia, se introducirá en esta tesis el concepto de convertidores ca/ca multinivel. Los convertidores ca/ca multinivel son una extensión de los convertidores ca/ca descritos anteriormente. Estos convertidores se analizan más adelante.

### 2.1.5. Filtro de salida pasabajos

La figura 2.8 muestra el diagrama de circuito para el filtro de salida pasabajos. La tarea del filtro  $LC$  es reducir los armónicos diferentes de la frecuencia fundamental de la salida del convertidor ca/ca, de tal manera que el contenido armónico resultante cumpla la normativa.

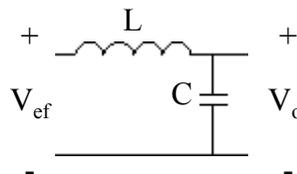


Figura 2.8. Filtro de salida pasa bajos.

### 2.1.6. Carga en corriente alterna

La carga de corriente alterna puede ser del tipo capacitiva, resistiva, inductiva o no lineal. Además, el convertidor tiene la capacidad de conectarse a una fuente de corriente alterna que puede ser un grupo electrógeno o la red eléctrica y transferir energía a la fuente de corriente continua. En el caso de que la parte de corriente alterna sea la red eléctrica, es necesario que la transferencia de energía se haga con factor de potencia elevado.

## 2.2. Inversores bidireccionales con aislamiento en alta frecuencia tipo directo

Una vez descritas las diferentes posibilidades de formar cada bloque del convertidor con enlace en alta frecuencia, ahora se presentarán las diferentes alternativas de inversores con aislamiento en alta frecuencia. Aquí se definen las diferentes topologías que se pueden utilizar para realizar la conversión de cc/ca con aislamiento en alta frecuencia. Se puede observar que la configuración del convertidor ca/ca está condicionada por la capacidad del convertidor cc/ca de generar tensión cero en el primario del convertidor.

### 2.2.1. Inversor con entrada medio puente y salida puente completo

Este inversor se forma al unir el convertidor cc/ca medio puente con un convertidor ca/ca puente completo. La figura 2.9 muestra el diagrama de circuito.

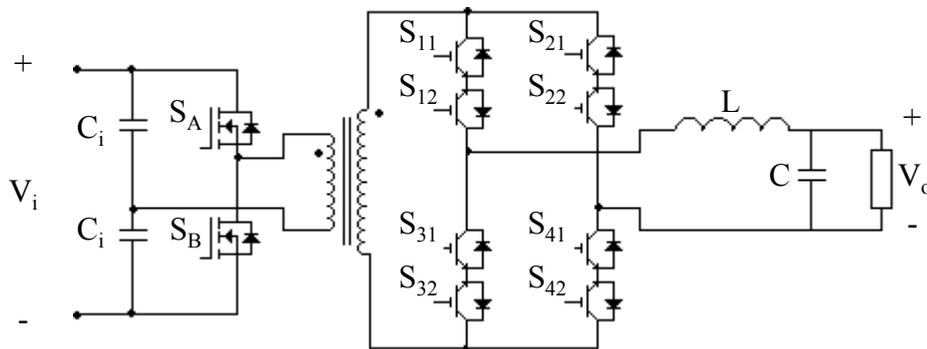


Figura 2.9. Inversor bidireccional con aislamiento en alta frecuencia medio puente/puente completo.

Esta configuración tiene la característica de que la tensión en el primario del transformador es la mitad de la tensión de entrada y la tensión del punto medio en los condensadores de entrada depende de la carga y descarga a través del convertidor cc/ca.

### 2.2.2. Inversor con entrada puente completo y salida medio puente o puente completo

La figura 2.10 muestra el diagrama de circuito del inversor con entrada puente completo. En este caso existen dos posibilidades de realizar el convertidor ca/ca. La figura 2.10 muestra el inversor utilizando el convertidor ca/ca con toma media. Este inversor se estudia en [2], [23], [26] y [61].

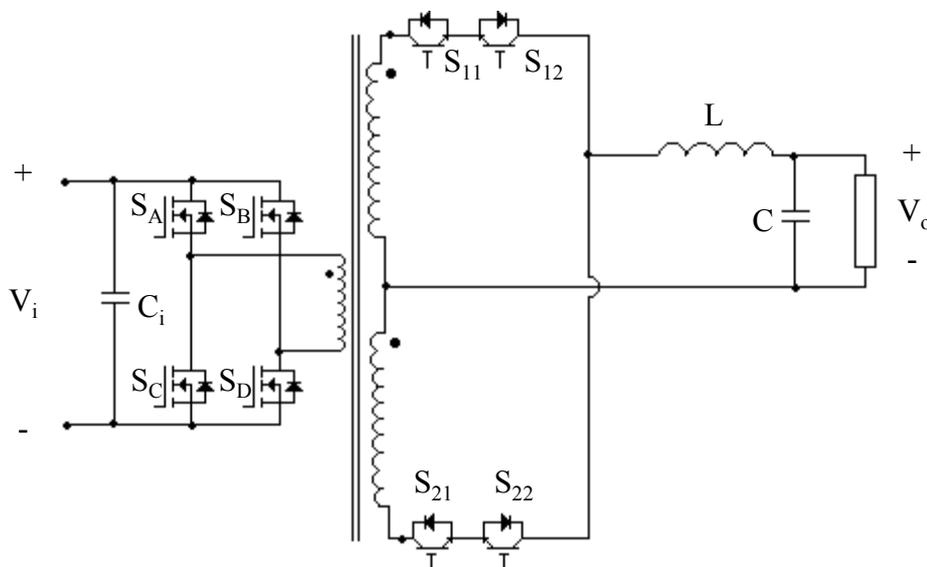


Figura 2.10. Inversor bidireccional con aislamiento en alta frecuencia puente completo/medio puente.

La otra opción para utilizar el convertidor cc/ca puente completo es utilizando el convertidor ca/ca puente completo en el lado del secundario. La figura 2.11 muestra el

diagrama de circuito. Este inversor bidireccional se estudia en [8], [9], [25], [40] y [61].

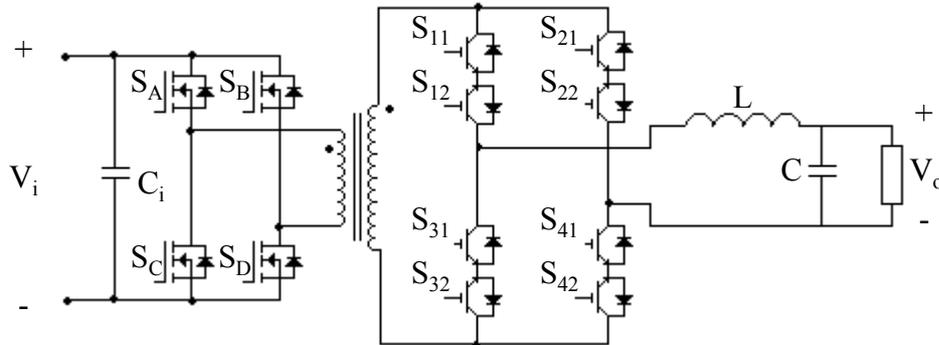


Figura 2.11. Inversor bidireccional con aislamiento en alta frecuencia puente completo/puente completo.

Se puede observar que la opción de la figura 2.10 requiere de una cantidad menor de transistores, y la corriente de salida del convertidor ca/ca presenta menores pérdidas por conducción al conducir un transistor y un diodo en cada momento. Sin embargo, los transistores deben manejar el doble de tensión que los transistores del convertidor ca/ca puente completo de la figura 2.11. Asimismo, se puede prever que el rendimiento del convertidor cc/ca se verá fuertemente afectado debido a las corrientes elevadas del lado de corriente continua ya que en el trayecto de la corriente siempre habrá dos dispositivos semiconductores.

### 2.2.3. Inversor con entrada push-pull y salida puente completo

Si el convertidor de entrada es *push-pull* el convertidor de salida debe ser en puente completo debido a las características del *push-pull* que no permiten generar tensión cero de forma controlada. La figura 2.12 muestra el diagrama de circuito del IBAAF utilizando la configuración puente completo en la salida.

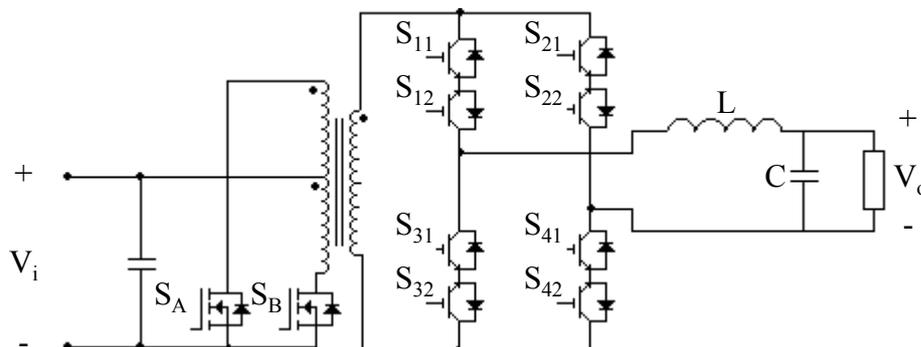


Figura 2.12. Inversor bidireccional con aislamiento en alta frecuencia push-pull/puente completo.

Los dispositivos semiconductores del convertidor *push-pull* presentan el doble de esfuerzo de tensión que el convertidor cc/ca puente completo, sin embargo, utilizan un único transistor en el trayecto de la corriente de la fuente de corriente continua.

### 2.2.4. Síntesis del inversor bidireccional multinivel con aislamiento en alta frecuencia basado en las topologías puente completo/medio puente

El convertidor cc/ca puente completo permite generar tensión cero, de tal forma que la síntesis de un convertidor ca/ca multinivel se puede realizar utilizando una extensión del convertidor ca/ca con toma media. El convertidor ca/ca multinivel se obtiene aprovechando la capacidad del transformador de entregar diferentes niveles de tensión. Dichos niveles de tensión se pueden aplicar a través de una estrategia de conmutación. Las ventajas que se obtienen al trabajar con inversores bidireccionales multinivel son: disminución de las pérdidas por conmutación, disminución de la distorsión armónica de tensión y de corriente y disminución del tamaño del filtro de entrada y de salida. La figura 2.13 muestra el diagrama de circuito.

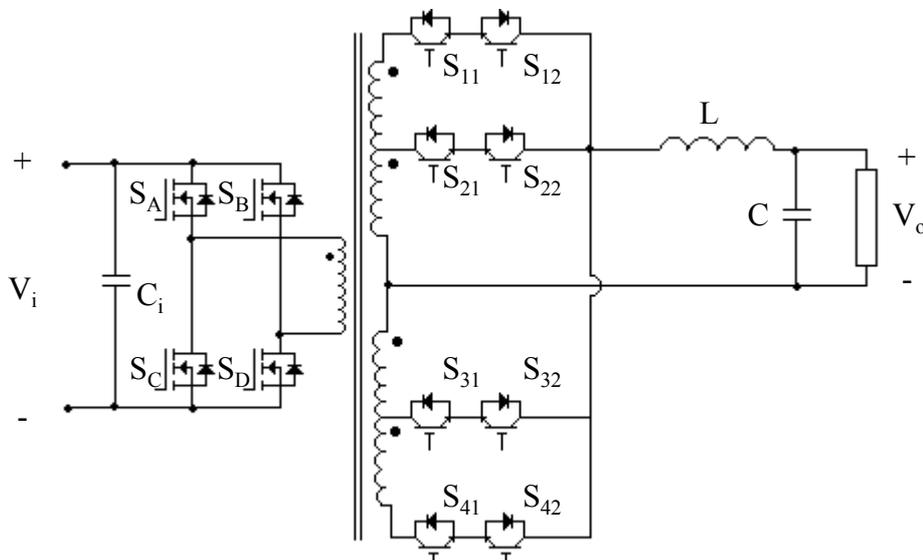


Figura 2.13. Inversor bidireccional multinivel con aislamiento en alta frecuencia basado en las topologías puente completo/medio puente.

### 2.2.5. Síntesis del inversor bidireccional multinivel con aislamiento en alta frecuencia basado en las topologías push-pull/puente completo

El convertidor *push-pull* es una buena opción para realizar el circuito convertidor cc/ca de alta frecuencia debido a que para realizar la conversión únicamente existe un transistor en la trayectoria de la corriente en el lado del primario del transformador. La configuración se muestra en la figura 2.14.

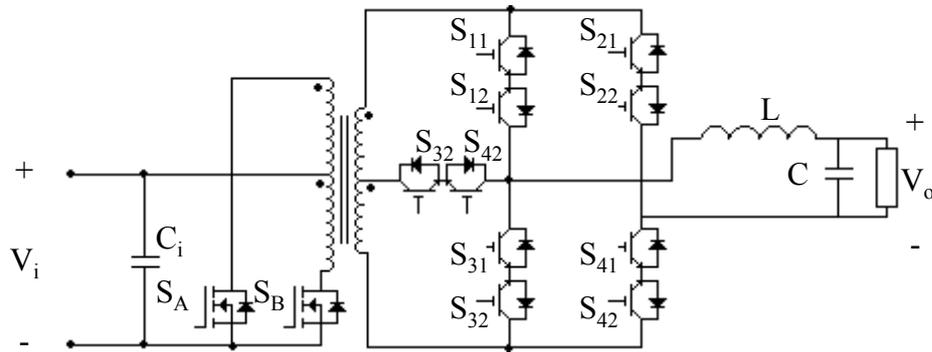


Figura 2.14. Inversor bidireccional con aislamiento en alta frecuencia y multinivel push-pull/puente completo.

A diferencia del convertidor cc/ca puente completo, con el convertidor *push-pull* no es posible asegurar una tensión cero, por lo cual es necesario utilizar una topología puente completo para el convertidor ca/ca.

### 2.3. Estrategias de modulación

Los convertidores descritos anteriormente basan su funcionamiento en tomar una señal de cc y transformarla en una señal de ca senoidal cuya magnitud y frecuencia es la misma que en la red eléctrica. Para realizar esto, es necesario establecer una estrategia de modulación que permita obtener a la salida del convertidor ca/ca una señal cuyos armónicos sean fáciles de filtrar. A continuación se exponen las dos estrategias disponibles y se escoge una de ellas.

#### 2.3.1. Estrategia de modulación PWM

Las técnicas de control PWM han sido ampliamente estudiadas. Con el objetivo de obtener una señal con magnitud y frecuencia controlada, se aplica una señal moduladora con la frecuencia deseada y se compara con una señal portadora triangular como se muestra en la figura 2.15.

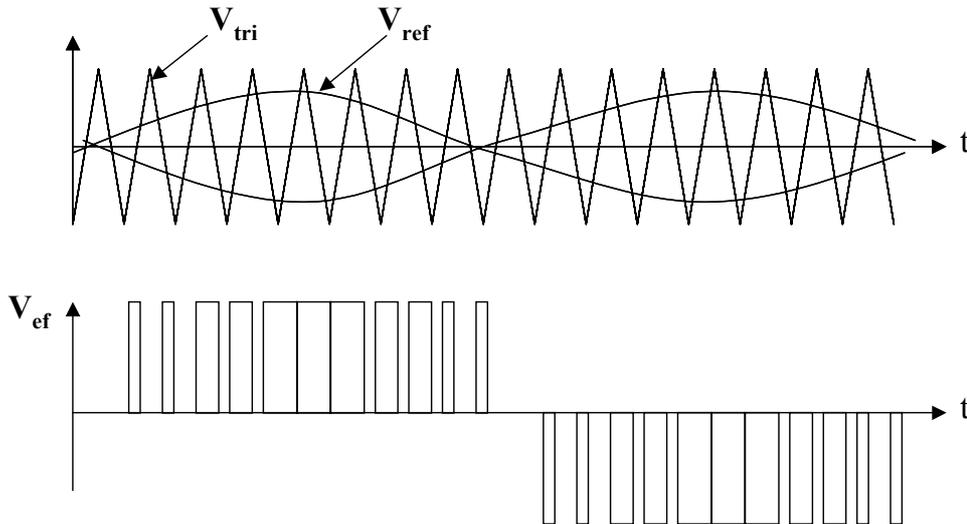


Figura 2.15. Estrategia utilizando modulación de anchura de pulso senoidal.

Para generar una tensión multinivel es necesario utilizar una extensión de la estrategia que se muestra en la figura 2.15. Una forma de realizarlo es utilizando la técnica presentada por Carrara en [32].

### 2.3.2. Estrategia de modulación en vectores de estado

Otra forma de implementar la modulación es utilizando el concepto de modulación de vectores de estado. La descripción en vectores de estado flexibiliza la implementación de diferentes estrategias de modulación, especialmente para la implementación de los inversores multinivel. A continuación se muestra el caso de dos niveles y el multinivel.

#### 2.3.2.1. Modulación para inversores de dos niveles

La figura 2.16 describe cómo los vectores de estado están definidos en el sistema. El objetivo es representar magnitudes senoidales mediante fasores. El eje real  $\alpha$  coincide con el valor de la tensión de entrada del filtro pasabajos  $V_{ef}$  (figura 2.8). El eje imaginario  $\beta$  es ortogonal. La proyección de los fasores sobre el eje real proporciona el valor instantáneo de la variable. Los vectores de estado representan los valores de tensión fija que proporciona el convertidor. Adecuadamente promediados, permiten generar la tensión de salida deseada. Los vectores de estado que se pueden aplicar a la entrada del filtro pasabajos son tres:  $\mathbf{V}_2=rtV_i+j0$ ,  $\mathbf{V}_0=0+j0$  y  $\mathbf{V}_1=-rtV_i+j0$ , donde  $rt$  es la relación de transformación, de tal forma que la posición relativa del vector de referencia en el semiplano derecho o izquierdo define qué vector es el que se tiene que utilizar. La proyección del vector de referencia sobre el eje horizontal define el ciclo de trabajo del vector de estado.

Los vectores de estado se pueden generar utilizando de forma conjunta al convertidor del lado del primario y al convertidor del lado del secundario. A las diferentes

combinaciones que se pueden utilizar para generar los vectores de estado les llamaremos vectores de estado de conmutación.

El vector de referencia se define como:

$$\mathbf{V}_{\text{ref}} = m e^{j\theta} \begin{cases} \theta = \omega t \\ \omega = 2\pi f_o \end{cases}$$

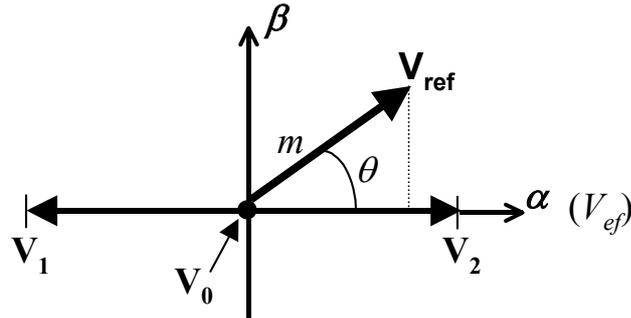


Figura 2.16. Diagrama de vectores de estado para el caso de dos niveles.

### 2.3.2.2. Modulación para inversores multinivel

Para el caso multinivel, los vectores de estado disponibles son cinco. La posición del vector de referencia determina si se utiliza el vector  $\mathbf{V}_1 = -2rtV_i + j0$ ,  $\mathbf{V}_2 = -rtV_i + j0$ ,  $\mathbf{V}_0 = 0 + j0$ ,  $\mathbf{V}_3 = rtV_i + j0$  o  $\mathbf{V}_4 = 2rtV_i + j0$ , como se muestra en la figura 2.17.

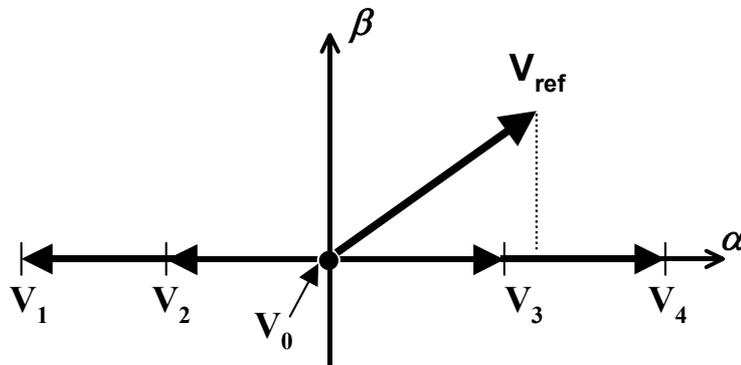


Figura 2.17. Diagrama de vectores de estado para el caso multinivel.

Este procedimiento de modulación por vectores de estado nos permite obtener diferentes estrategias de modulación que permitan reducir el contenido armónico de la tensión de salida.

En esta tesis se propone analizar dos estrategias de modulación de las diferentes opciones que se pueden escoger. La primera estrategia de modulación se enfocaría en optimizar el rendimiento del convertidor ca/ca y la segunda la distorsión armónica total de la corriente y la tensión de salida.

#### A. Estrategia de modulación unipolar multinivel (EMUM)

La primera modulación de vectores de estado se basa en descomponer la proyección del vector de referencia sobre el eje  $\alpha$  en dos vectores, el vector correspondiente a  $V_1$ ,  $V_2$ ,  $V_3$ ,  $V_4$  y el vector cero,  $V_0$ . La figura 2.18 muestra de forma gráfica la utilización de los vectores de tensión que se aplicarán en la EMUM.

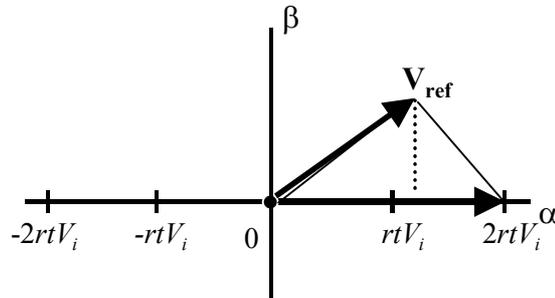


Figura 2.18. Descomposición de la proyección del vector de referencia en EMUM.

*B. Estrategia de modulación de los dos vectores más cercanos (EM2VMC)*

La segunda modulación de vectores de estado se basa en descomponer la proyección del vector de referencia sobre el eje  $\alpha$  en dos vectores, los más cercanos a la proyección de  $V_{ref}$  sobre el eje  $\alpha$ . La figura 2.19 muestra de forma gráfica la utilización de los vectores de tensión que se aplicarán en la EM2VMC.

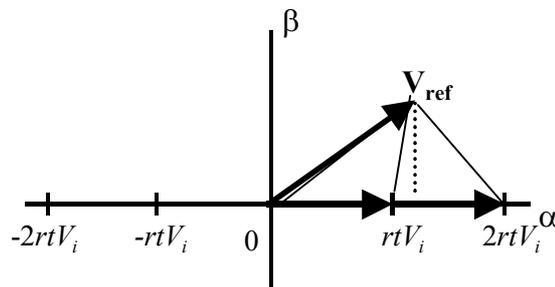


Figura 2.19. Descomposición de la proyección del vector de referencia en EM2VMC.

**2.4. Estrategia de conmutación**

Debido a las características topológicas de los IBAAF, es necesario cumplir con ciertas reglas:

- No se permite cortocircuitar la fuente de cc.
- No se permite dejar en circuito abierto las inductancias del convertidor.

Para cumplir con estas reglas es necesario establecer diferentes estrategias de conmutación tanto para el convertidor cc/ca de alta frecuencia del lado del primario del transformador como para el convertidor ca/ca del lado del secundario del transformador.

En el convertidor cc/ca de alta frecuencia se introduce el tiempo de blanqueo, de tal forma que dos interruptores que puedan cortocircuitar la fuente de cc no pueden

conducir a la vez. Todas las topologías de convertidores cc/ca cuentan con transistores que tienen diodos en antiparalelo para manejar la energía reactiva ya sea del transformador de alta frecuencia, del filtro de salida o de la carga.

En los convertidores ca/ca se introduce la técnica de conmutación escalonada que se basa en tiempos de traslape de conducción de transistores. De esta forma se puede conmutar sin cortocircuitar la fuente de corriente continua y sin dejar en circuito abierto el filtro de salida.

A pesar de que se introducen una serie de conmutaciones extras, esto no se ve traducido en pérdidas ya que la mayoría se realizan a corriente o a tensión cero. De tal forma que el rendimiento no se vea reducido.

## 2.5. Modelado de inversores con aislamiento en alta frecuencia

El modelado de IBAAF se realizará utilizando una misma metodología. La metodología se resume a continuación, esta metodología se puede encontrar en [60]:

- En primer lugar se obtiene un modelo de interruptores del inversor.
- Después se obtienen las ecuaciones que definen al inversor utilizando funciones de conmutación.
- Posteriormente, utilizando el análisis de circuitos, se obtienen las ecuaciones de estado que definen al sistema. Se utiliza a la corriente por la bobina del filtro de salida y la tensión de salida como variables de estado. Este modelo es discreto, por el uso de las funciones de conmutación. También es variante en el tiempo, incluso cuando el inversor está en régimen permanente, pues la mayoría de las variables son de ca, básicamente a la frecuencia de red.
- Para obtener el modelo en espacio de estado promediado es necesario promediar las ecuaciones de estado que definen al sistema. Para ello se utilizará el promediado móvil definido por la expresión (2.1).

$$\bar{x}(t) = x_{prom}(t) = \frac{1}{T_s} \int_{t-T_s}^t x(\tau) d\tau \quad (2.1)$$

Un promediado como el de la expresión (2.1), suponiendo que la frecuencia de conmutación del inversor es mucho mayor que a la frecuencia de la tensión de salida, se comporta como un filtro pasabajos, para las frecuencias múltiples de la frecuencia de conmutación. En el modelado de los IBAAF la frecuencia de conmutación es de 20 kHz y la de salida es la frecuencia de red (50 Hz en el caso europeo). Por lo tanto el promediado definido en (2.1) no afecta al comportamiento dinámico del modelo, pero si es útil para convertirlo en un modelo de tiempo continuo.

- Una vez que se completa el paso anterior el procedimiento se enfoca a convertir el modelo promediado en un modelo invariante en el tiempo utilizando la transformación de ejes estacionarios  $\alpha\beta$  en coordenadas rotatorias  $dq$ , para aquellas variables cuyo contenido armónico sea esencialmente el de la frecuencia de rotación de los ejes  $dq$ . La frecuencia de rotación de los ejes  $dq$  se escoge igual a la frecuencia de salida del inversor. La fase  $\delta$  se escoge para alinear el eje directo  $d$  con la magnitud que se desee, siendo generalmente la tensión de salida  $V_o$ . La figura 2.20 muestra la disposición de esta transformación.

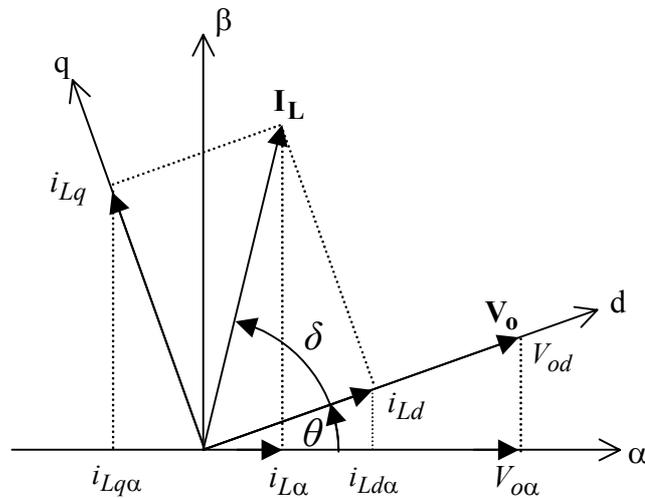


Figura 2.20. Transformación a coordenadas  $dq$ .

Las ecuaciones que se obtienen utilizando la transformación  $dq$  tienen valores constantes en régimen permanente si el algoritmo de modulación de los transistores proporciona una aproximación razonable de las relaciones de conducción en términos senoidales.

- Finalmente se aplica el método general de linealización, basado en la hipótesis de pequeña señal y la aplicación de la fórmula de Taylor en  $\mathbf{R}^n$ . De esta forma se obtiene un modelo en pequeña señal y un modelo en gran señal.

## 2.6. Elección del sistema de control

Para los IBAAF las variables a regular pueden ser la tensión de salida y la corriente de salida. Para diseñar el regulador del sistema es necesario estudiar la controlabilidad y la observabilidad. Es necesario analizar si el sistema es observable y controlable. En el caso de IBAAF todas las variables de estado se pueden medir fácilmente, por lo que no es necesario usar estimación de estado. Por tanto no se precisa comprobar observabilidad. El control se diseña en coordenadas  $dq$  por simplicidad. La ventaja es que las coordenadas  $dq$  no son variantes en el tiempo.

La técnica de control elegida es la técnica de control LQR (*Linear Quadratic Regulator*) para cerrar el lazo debido a dos razones principales:

1. Las matrices de peso de las variables de estado y de las variables de control (Q, R) pueden seleccionarse por el diseñador y verificarse por simulación. Además *matlab* incluye la función de optimización LQR que minimiza la función de coste  $J$ .
2. Las variables de estado pueden medirse fácilmente.

La técnica de control LQR calcula la matriz de control  $K$  tal que minimiza la función de coste  $J$  de (2.2) y relaciona el control con el estado de forma  $[u] = -[K][x]$ . Las matrices  $Q$  y  $R$  se seleccionan de tal forma que reflejen el "coste" del sistema.

$$J = \int_t^{T_s} \left( [x]^T [Q][x] + [u]^T [R][u] \right) dt \quad (2.2)$$

## 2.7. Elección del entorno de simulación

Existen diferentes programas informáticos que permiten realizar diversas simulaciones en el campo de la electrónica de potencia. La elección de esta herramienta depende del objetivo que se persiga. En el caso de IBAAF<sub>M</sub> se requiere cuantificar las ventajas en cuanto a reducción del filtro de salida y reducción de la distorsión armónica de tensión y corriente comparado con los IBAAF. Asimismo, es necesario realizar simulaciones para la realización del control e implementarlas de forma experimental utilizando un banco de pruebas basado en *dSPACE*. Para realizar esto se puede ver que la herramienta más adecuada es la utilización de *Matlab-Simulink*. Además de esto, este entorno de simulación es amigable y contiene herramientas que permiten trabajar con elementos pasivos y activos.

Por otro lado se requiere conocer el comportamiento del inversor ante ciertos detalles de conmutación y además también se requiere verificar el comportamiento de algunos circuitos de recuperación de energía de tal forma que es necesario simular los modelos de los transistores utilizados así como transformadores y bobinas. Para llevar a cabo este tipo de simulación la mejor herramienta disponible es *pspice*, que además cuenta con una gran cantidad de modelos de transistores y transformadores, y sus herramientas de visualización son muy flexibles.

## 2.8. Conclusiones

La aportación principal de este capítulo es la propuesta de una metodología para el análisis y síntesis de inversores bidireccionales con aislamiento en alta frecuencia para topologías de dos niveles y multinivel.

La metodología empleada permitirá diseñar cualquier inversor bidireccional de tipo directo, independientemente de la topología que se utilice.

Se pueden dividir los inversores bidireccionales con aislamiento en alta frecuencia en 6 partes: la fuente de corriente continua, el convertidor cc/ca, el transformador de alta frecuencia, el convertidor ca/ca, el filtro de salida pasabajos y la carga de corriente alterna.

Los inversores bidireccionales tienen la característica de poder entregar potencia del lado de cc al lado de ca y viceversa. Por esta razón es recomendable la utilización de fuentes de cc que puedan entregar energía, pero que también la puedan recibir, este es el caso de las baterías, algún tipo de celdas de combustible, supercondensadores, etc. Asimismo es importante considerar la necesidad de un filtro capacitivo a la entrada de la fuente de corriente continua para manejar el rizado de corriente de alta frecuencia. Se podrán ver más adelante las ventajas de las topologías multinivel en el diseño de este filtro capacitivo.

Para inversores de tipo directo, se pueden utilizar diferentes topologías de convertidores cc/ca. Las dos topologías elegidas para la realización de la conversión cc/ca son la topología puente completo y la topología medio puente. Ambas topologías requieren únicamente una fuente de tensión de entrada, de tal forma que se elimina el problema de desequilibrio de la fuente de corriente continua, como es el caso de la topología medio puente.

- El convertidor cc/ca puente completo presenta las siguientes características: está conformado por 4 transistores con lo cual puede manejar mayor potencia que el convertidor cc/ca *push-pull*; la caída de tensión de cada transistor es aproximadamente la tensión de entrada; el convertidor puede entregar señal de tensión rectangular o modulada en anchura de pulso debido a la posibilidad de generar tensión cero; no necesita circuitos de *snubber* debido a que siempre existe una trayectoria de la corriente por el primario del transformador; el transformador de alta frecuencia requiere únicamente de un devanado primario; finalmente, en el convertidor cc/ca puente completo, en cada momento, conducen dos dispositivos semiconductores a la vez, esto es un aspecto crítico debido a la necesidad de manejar tensión de entrada baja y como consecuencia la corriente por el convertidor cc/ca es elevada, lo que se traduce en pérdidas por conducción elevadas.
- El convertidor cc/ca *push-pull* presenta las siguientes características: está conformado por dos transistores y ambos transistores están referidos a la tierra de la fuente de corriente continua, de tal forma que se requiere únicamente una fuente de alimentación para su accionamiento; el esfuerzo de tensión de cada transistor es aproximadamente el doble de la tensión de entrada; el convertidor puede entregar una salida de tensión rectangular, sin embargo, no puede garantizar la aplicación de tensión cero, con lo cual no se

puede aplicar la modulación de anchura de pulso en este convertidor; es necesario utilizar circuitos de *snubber* debido al efecto de las inductancias de dispersión en el primario del transformador; el transformador de alta frecuencia requiere dos devanados primarios; finalmente, en el convertidor *cc/ca push-pull*, conduce un dispositivo semiconductor en cada momento, esta característica es importante debido a la necesidad planteada de manejar corrientes elevadas en el convertidor *cc/ca*.

Las inductancias de dispersión se deben minimizar en el diseño y fabricación del transformador de alta frecuencia. El transformador se caracteriza por introducir inductancias de dispersión en el secundario. Por tanto, se utiliza un circuito de recuperación de energía que devolverá la energía almacenada en las inductancias dispersas del secundario del transformador. El convertidor *cc/ca push-pull*, requiere circuitos de *snubber* que serán diseñados para absorber la energía almacenada en las inductancias dispersas de cada devanado primario, de tal forma que mientras menos inductancia dispersa se tenga, los circuitos de *snubber* y de recuperación circularán menos energía.

El principal requerimiento del convertidor *ca/ca* para inversores bidireccionales con aislamiento en alta frecuencia es convertir una señal de *ca* de alta frecuencia en una señal de *ca* de baja frecuencia. Las topologías que se pueden utilizar son: convertidor *ca/ca* puente completo, convertidor *ca/ca* medio puente, convertidor *ca/ca* multinivel puente completo, convertidor *ca/ca* multinivel medio puente.

- El convertidor *ca/ca* puente completo, presenta las siguientes características: utiliza 4 interruptores bidireccionales, cada uno formado por dos transistores conectados en antiserie; el esfuerzo de tensión de cada interruptor es aproximadamente la tensión del devanado secundario; únicamente es necesario un devanado secundario del transformador de alta frecuencia; el convertidor puede actuar como cambiador de polaridad, si la modulación de anchura de pulso se realiza en el convertidor *cc/ca* o bien puede trabajar con una tensión rectangular a la entrada y modular la tensión en anchura de pulso; es necesario utilizar un circuito de *snubber* o de recuperación de energía en el secundario; la trayectoria de corriente en el convertidor *ca/ca* puente completo siempre pasa por cuatro dispositivos semiconductores.
- El convertidor *ca/ca* medio puente, presenta las siguientes características: utiliza dos interruptores bidireccionales, cada uno formado por dos transistores conectados en antiserie (dos interruptores menos que la topología puente completo); el esfuerzo de tensión de cada interruptor es aproximadamente el doble de cada interruptor de la configuración puente completo; se requieren dos devanados secundarios del transformador de alta frecuencia; el convertidor puede trabajar como cambiador de polaridad si la modulación de anchura de pulso se realiza en el convertidor *cc/ca* y no puede

generar tensión cero; la trayectoria de corriente en el convertidor ca/ca medio puente pasa por dos dispositivos semiconductores en todo momento (dos dispositivos semiconductores menos que en la configuración puente completo).

- El convertidor ca/ca multinivel medio puente presenta las siguientes características: utiliza cuatro interruptores bidireccionales; el esfuerzo de tensión de cada interruptor depende del devanado en el que esté, siendo el esfuerzo máximo igual al esfuerzo de tensión de los interruptores del convertidor ca/ca medio puente de dos niveles; se requieren cuatro devanados secundarios del transformador de alta frecuencia; no puede generar tensión cero, pero puede aplicar tensión multinivel y la modulación de anchura de pulso se puede aplicar en este convertidor; la trayectoria de corriente en el convertidor ca/ca pasa por dos dispositivos semiconductores y se reparte entre cuatro interruptores.
- El convertidor ca/ca multinivel puente completo presenta las siguientes características: utiliza cinco interruptores bidireccionales; el esfuerzo de tensión de cada interruptor es similar a la topología puente completo de dos niveles, sin embargo la conexión a la toma media disminuye el esfuerzo de tensión de algunos interruptores; se requieren dos devanados secundarios del transformador de alta frecuencia; se puede generar tensión cero y se puede aplicar tensión multinivel a la salida del convertidor; la trayectoria de corriente pasa por cuatro dispositivos semiconductores en todo momento.

El filtro de salida debe diseñarse para atenuar los armónicos de alta frecuencia y dejar pasar la señal de tensión senoidal a la carga. En adelante se trabajará con un filtro de salida pasabajos tipo LC, y se utilizará el mismo diseño para inversores de dos niveles y poder realizar una comparación.

Los inversores bidireccionales son capaces de intercambiar energía reactiva con la carga de corriente alterna debido a su funcionamiento en cuatro cuadrantes, de tal forma que puede alimentar cargas resistivas, inductivas o no lineales. Además, puede tomar la parte de corriente alterna como fuente de alimentación y transferir energía al lado de corriente continua.

Las estrategias de modulación y de conmutación se realizan utilizando el concepto de vectores de estado, una práctica muy utilizada en técnicas multinivel. El modelado de los inversores bidireccionales con aislamiento en alta frecuencia se realiza utilizando transformación a coordenadas DQ. Y se propone un tipo de control lineal multivariable (LQR) que ha sido utilizado de forma extensa en convertidores de potencia.