

CAPÍTULO 1

1. INTRODUCCIÓN

- 1.1. UBICACIÓN DEL ÁMBITO DE ESTUDIO DEL TRABAJO DE INVESTIGACIÓN
- 1.2. SISTEMAS DE CONVERSIÓN CC/CA QUE REQUIEREN AISLAMIENTO ELÉCTRICO
 - 1.2.1. Sistemas de alimentación fotovoltaicos
 - 1.2.1.1. *Sistemas fotovoltaicos autónomos*
 - 1.2.1.2. *Sistemas fotovoltaicos conectados a red*
 - 1.2.2. Sistemas de celdas de combustible
 - 1.2.3. Sistemas de alimentación ininterrumpida
 - 1.2.4. Compensación armónica
- 1.3. VENTAJAS DE LOS INVERSORES CON FLUJO DE POTENCIA BIDIRECCIONAL
- 1.4. CLASIFICACIÓN DE LOS INVERSORES BIDIRECCIONALES CON AISLAMIENTO ELÉCTRICO SIN FILTRO INTERMEDIO EN CORRIENTE CONTINUA
 - 1.4.1. Inversores de tipo directo
 - 1.4.2. Inversores de tipo indirecto
- 1.5. LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN ACTUALES
- 1.6. VENTAJAS DE UNA NUEVA LÍNEA DE INVESTIGACIÓN EN INVERSORES BIDIRECCIONALES MULTINIVEL CON AISLAMIENTO EN ALTA FRECUENCIA
- 1.7. PLANTEAMIENTO Y RESUMEN DE LA TESIS
- 1.8. OBJETIVOS
- 1.9. CONCLUSIONES

CAPÍTULO 1

1. Introducción

El objetivo de este capítulo es ubicar el ámbito de estudio de esta tesis doctoral dentro del campo de aplicación actual de los inversores con aislamiento en alta frecuencia y capacidad de flujo de potencia bidireccional.

En primer lugar se expondrá la necesidad de aislamiento eléctrico en convertidores de potencia cc/ca, posteriormente se abordarán los sistemas que requieren aislamiento eléctrico ya sea por seguridad o por normativa. Dentro de estos sistemas con necesidad de aislamiento se tratarán los que incluyen inversores con capacidad de flujo de potencia bidireccional.

Entrando en el tema de los inversores de potencia se revisará el estado actual de inversores para aplicaciones que requieren aislamiento. Posteriormente se establecerán los parámetros de rendimiento utilizados para medir las características de procesamiento de dichos inversores. Finalmente se presentarán las ventajas de iniciar una nueva línea de investigación de los inversores con aislamiento en alta frecuencia y multinivel.

1.1. Ubicación del ámbito de estudio del trabajo de investigación

La electrónica de potencia se utiliza cada vez más en diferentes aplicaciones, su tarea consiste en procesar y controlar el flujo de la energía eléctrica por medio del suministro de voltajes y corrientes en una forma óptima que pueda ser aprovechada por las diferentes cargas. Este procesamiento debe realizarse con convertidores que tengan características de alto rendimiento, alta densidad de potencia, bajo coste y alta calidad de la tensión y corriente en las terminales de los convertidores.

Dentro de la electrónica de potencia ubicaremos nuestro trabajo en los convertidores cc/ca cuya magnitud y frecuencia en el lado de ca es la misma de la red eléctrica.

Algunas aplicaciones que necesitan la conversión cc/ca requieren el uso de transformadores de aislamiento ya sea por seguridad o por normativa. Algunos ejemplos pueden ser convertidores para aplicaciones médicas y computacionales, aplicaciones en sistemas fotovoltaicos o compensación armónica.

Aparte del aislamiento eléctrico, los transformadores proporcionan reducción o elevación de la tensión y/o de la corriente, además de tener la capacidad de entregar múltiples niveles de tensión.

Los transformadores son una de las partes con mayor peso y de mayor coste en los convertidores con aislamiento eléctrico cuando se utilizan a baja frecuencia dado que la baja frecuencia de operación incide en una baja densidad de potencia. La medida del transformador es una función de la densidad de flujo de saturación del material del núcleo y de la máxima elevación de temperatura permisible en el núcleo y los devanados. La densidad de flujo de saturación es inversamente proporcional a la frecuencia, de tal forma que al incrementar la frecuencia trabajo se puede tener una mayor utilización del núcleo magnético y por lo tanto la reducción de la medida del transformador. Sin embargo, las pérdidas del núcleo se incrementan con la frecuencia, por lo tanto, la densidad de flujo debe ser optimizada.

1.2. Sistemas de conversión cc/ca que requieren aislamiento eléctrico

El aislamiento eléctrico es necesario para sistemas de conversión donde se requiera el acoplamiento con la red eléctrica. Las aplicaciones de los sistemas de conversión cc/ca con aislamiento eléctrico incluyen los fotovoltaicos autónomos, los sistemas de energía renovable con conexión a red utilizando celdas fotovoltaicas o celdas de combustible y aplicaciones donde se utiliza almacenamiento por baterías para sistemas de alimentación ininterrumpida y compensación armónica.

1.2.1. Sistemas de alimentación fotovoltaicos

La energía solar fotovoltaica es una forma limpia y distribuida de producción de energía eléctrica. La investigación y el desarrollo tecnológico que se realiza en esta área posibilitan una penetración cada vez mayor de esta tecnología en la producción de energía eléctrica en el mundo como complemento de las fuentes de generación de energía convencionales.

Los sistemas fotovoltaicos se pueden conectar de forma autónoma o con conexión a red.

1.2.1.1. Sistemas fotovoltaicos autónomos

Los sistemas fotovoltaicos autónomos (SFA) son un conjunto de elementos interconectados entre sí con el fin de proporcionar energía eléctrica a una determinada carga o cargas; éstas pueden ser elementos de iluminación, equipos de telecomunicaciones, frigoríficos, motores de bombeo, electrodomésticos en general, etc. En el caso particular donde las cargas requieren ser alimentadas en corriente alterna, se requiere un sistema como el que se muestra en la figura 1.1.

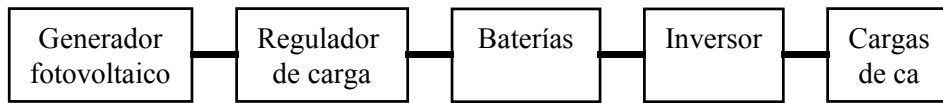


Figura 1.1. Sistema fotovoltaico autónomo para alimentación de cargas de ca.

El rendimiento de los convertidores que realicen el proceso de conversión de energía eléctrica debe ser alto en estos sistemas ya que se debe considerar que el consumo energético que se realice será el que la reserva energética les permita, a diferencia de los consumidores de energía eléctrica de la red que pueden consumir sin ninguna restricción.

1.2.1.2. Sistemas fotovoltaicos conectados a red

Los sistemas fotovoltaicos conectados a la red son aquellos cuya instalación está motivada por la inyección de energía eléctrica a la red, ya sea con ánimo de venta de la producción eléctrica que genere el sistema fotovoltaico o como apoyo a la red eléctrica.

Los sistemas fotovoltaicos conectados a la red eléctrica constituyen una de las aplicaciones de la energía solar que más atención está recibiendo en los últimos años, dado su elevado potencial de utilización en zonas urbanizadas próximas a la red eléctrica. Estos sistemas están compuestos por un generador fotovoltaico que se encuentra conectado a la red eléctrica convencional a través de un inversor, produciéndose un intercambio energético entre el sistema fotovoltaico y la red, característico de este tipo de instalaciones. Así el sistema inyecta energía en la red cuando su producción supera al consumo local, y extrae energía de ella en caso contrario.

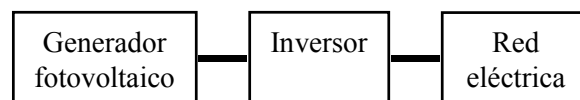


Figura 1.2. Sistema fotovoltaico conectado a red.

Una de sus principales características es la posibilidad de mejorar la calidad del servicio de la energía suministrada por la red, principalmente en lugares donde la radiación solar es elevada, ya que la máxima producción del sistema fotovoltaico coincide con horas en que los problemas de suministro para las compañías eléctricas son más graves (horas pico).

Por otro lado, dado la creciente utilización de estos sistemas, se ha aplicado una regulación estricta de los equipos conectados a red. Estas regulaciones están relacionadas con la distorsión de las corrientes armónicas, factor de potencia, protecciones etc. Asimismo para el uso extenso de los sistemas fotovoltaicos se requiere que el sistema que realiza la conversión cc/ca tenga alta densidad de potencia, sea ligero, y con alto rendimiento. La figura 1.3 muestra el sistema convertidor cc/ca

convencional el cual utiliza un transformador de baja frecuencia (frecuencia comercial) para obtener aislamiento eléctrico entre las células fotovoltaicas y la red.

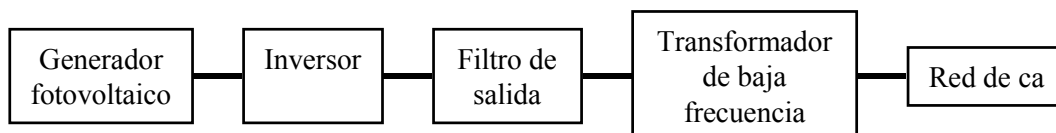


Figura 1.3. Sistema fotovoltaico conectado a red utilizando transformador de baja frecuencia.

En este caso el transformador evita que el sistema pueda reducir su tamaño y peso, dado que la baja frecuencia de operación incide en una baja densidad de potencia. Para resolver este problema, se han desarrollado varios métodos utilizando transformadores de alta frecuencia de menor tamaño [1].

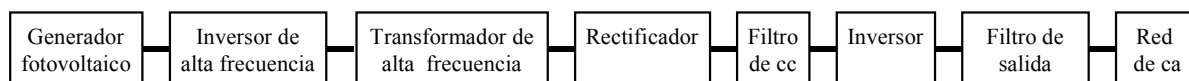


Figura 1.4. Utilización de transformador de alta frecuencia en aplicaciones fotovoltaicas.

Se puede observar que el tamaño del transformador se reduce utilizando un inversor en alta frecuencia. Sin embargo, en el diagrama de la figura 1.4, se requieren dos circuitos de control con diferentes procesos de conmutación y las pérdidas son elevadas debido a la conexión en cascada de las dos etapas de procesamiento de potencia de alta frecuencia. Además de esto, la energía reactiva no se puede intercambiar por el rectificador.

1.2.2. Sistema de celdas de combustible

Las celdas de combustible son una gran alternativa para emplear compuestos derivados del petróleo de manera más eficiente alargando así la duración de estas fuentes de energía y significando una transición hacia tecnologías que sustituyan las basadas en hidrocarburos [1]. Por otra parte, el impulso al uso de sistemas de generación a partir de energías de fuentes renovables (solar, biomasas, eólica, etc.) puede verse favorecido y estimulado por la tecnología de celdas de combustible, ya que la flexibilidad del tipo de combustible de éstas le permite integrarse en un sistema que considere combustibles directos de fuentes renovables (biomasas) y/o combustibles fácilmente generados como el hidrógeno a partir de tecnologías como la solar y la eólica. Ello significa la posibilidad de una transición en dirección hacia tecnologías limpias y al uso de fuentes renovables de energía.

Las celdas de combustible tienen las siguientes ventajas sobre los sistemas de generación convencional[2].

- Baja contaminación medioambiental.
- Generación de energía altamente eficiente.
- Diversidad de combustibles.

- Reutilización del calor extraído.
- Modular.
- Rápida instalación.

El diagrama de bloques de la conexión de las celdas de combustible a cargas de ca se muestra en la figura 1.5.

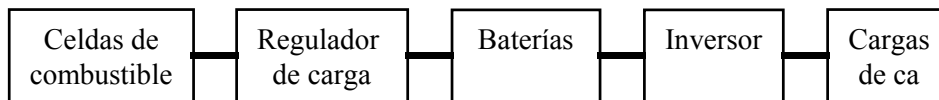


Figura 1.5. Diagrama de bloques de un sistema alimentado con celdas de combustible.

1.2.3. *Sistemas de alimentación ininterrumpida*

Para alimentar cargas críticas, tales como computadoras que controlan procesos importantes, o algún equipo médico, es necesario utilizar sistemas de alimentación ininterrumpida (SAI). Los SAI's dan alimentación cuando la alimentación principal falla y también cuando existe alguna subida o bajada de tensión. El diagrama de bloques de un SAI conectado normalmente al inversor se muestra en la figura 1.6.

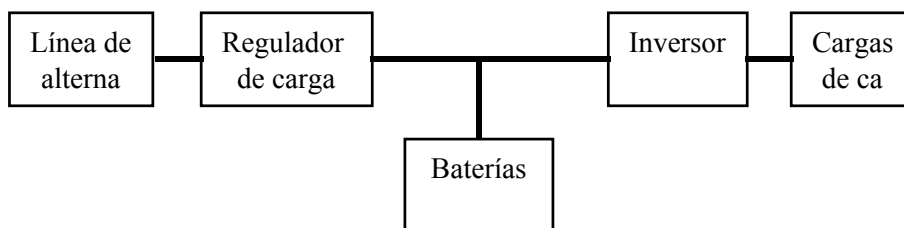


Figura 1.6. Diagrama de bloques de un sistema de alimentación ininterrumpida.

Para introducir el aislamiento eléctrico de la red se puede utilizar un convertidor cc/cc con transformador de alta frecuencia y, de ser necesario, un transformador de alta frecuencia en el inversor.

1.2.4. *Compensación armónica*

Idealmente, la fuente de voltaje suministrada por la red eléctrica debería ser una senoide perfecta. Sin embargo en la práctica difiere de su condición ideal debido a perturbaciones de la línea de potencia. Estas perturbaciones pueden ser; voltaje sobre la tensión nominal, voltaje bajo la tensión nominal, pérdida de voltaje de línea por varios ciclos, distorsión de la tensión etc. Los efectos de estas perturbaciones en equipo sensible pueden ser perjudiciales.

1.3. **Ventajas de los inversores con flujo de potencia bidireccional**

Las cargas de los inversores de potencia pueden ser resistivas, inductivas o capacitivas, de tal forma que la energía puede fluir en ambos sentidos. En sistemas alimentados con baterías es importante que la energía reactiva regrese a la fuente de corriente

continua y además, por cuestiones de coste y tamaño, es deseable que la característica de bidireccionalidad esté en el mismo inversor.

1.4. Clasificación de los inversores bidireccionales con aislamiento eléctrico sin filtro intermedio en corriente continua

Los convertidores cc/ca con aislamiento eléctrico, bidireccionales y sin filtro intermedio en corriente continua se pueden clasificar dependiendo de la característica de funcionamiento del transformador.

1.4.1. Inversor de tipo directo

Los inversores de tipo directo transfieren la energía por el transformador sin utilizarlo como elemento de almacenamiento de energía.

El inversor de tipo directo se basa en utilizar un convertidor cc/ca utilizando una topología que puede ser: puente completo, medio puente o *push-pull*. El convertidor cc/ca genera una señal modulada en anchura de pulso o con anchura de pulso fijo; esta señal se eleva utilizando el transformador de alta frecuencia, posteriormente se utiliza un convertidor ca/ca con interruptores bidireccionales que puede actuar como rectificador positivo o negativo, en el caso en que el convertidor cc/ca entregue una señal modulada en anchura de pulso o puede funcionar con modulación de anchura de pulso, en el caso en que el convertidor cc/ca entregue una señal con anchura de pulso fijo. Finalmente el filtro pasabajos elimina los armónicos de orden elevado y entrega una señal senoidal. La figura 1.7 muestra el diagrama de bloques de un inversor de tipo directo con la modulación de anchura de pulso en el convertidor cc/ca. La figura 1.8 muestra el diagrama de bloques aplicando la modulación de anchura de pulso en el convertidor ca/ca.

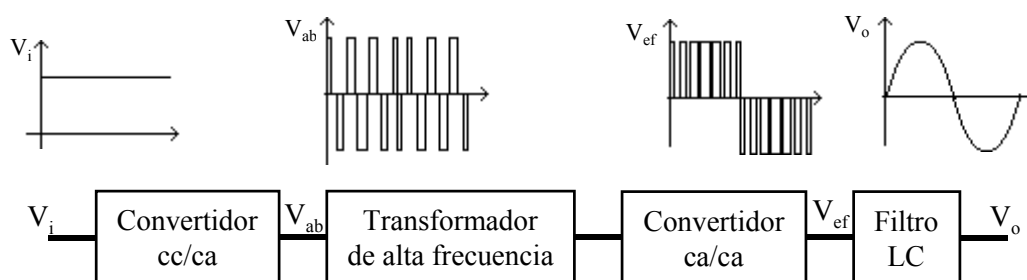


Figura 1.7. Inversor bidireccional de tipo directo con la modulación de anchura de pulso en el convertidor cc/ca.

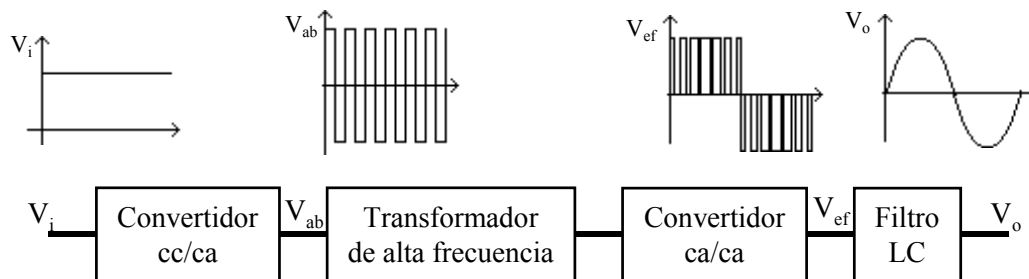


Figura 1.8. Inversor bidireccional de tipo directo con la modulación de anchura de pulso en el convertidor ca/ca.

1.4.2. Inversor de tipo indirecto

Los inversores de tipo indirecto almacenan energía de forma temporal en el transformador durante un intervalo del periodo de conmutación.

El inversor de tipo indirecto se basa en utilizar el convertidor *flyback* para generar una señal de tensión cuyo valor corresponde a un semiciclo de la señal de línea, de tal forma que con una segunda etapa de inversión del signo se puede generar la señal senoidal aplicable a la carga de alterna.

1.5. Líneas de investigación actuales

Actualmente existe una extensa investigación en inversores con aislamiento en alta frecuencia. Las aplicaciones incluyen: compensación en las variaciones de tensión de línea [4], [5] y [6]; aplicaciones en fuentes de alimentación utilizando celdas de combustible [11] y [13]; sistemas fotovoltaicos enlazados con la red eléctrica [1] y [2]; fuentes de alimentación ininterrumpida [3]. Asimismo se han realizado propuestas de mejora en las estrategias de conmutación [18], [19] y [21] así como para eliminar los circuitos de ayuda a la conmutación [20] y [22].

1.6. Ventajas de una nueva línea de investigación en inversores bidireccionales multinivel con aislamiento en alta frecuencia

En esta tesis se introduce el concepto de inversor bidireccional multinivel con aislamiento en alta frecuencia.

La propuesta de esta línea de investigación se basa en las ventajas inherentes de reducción del rizado en la corriente por el filtro pasabajos teniendo la opción de reducir el tamaño del filtro de salida y del filtro de entrada, la reducción de las pérdidas por conmutación al utilizar niveles de tensión escalonados en el convertidor ca/ca y la calidad de la tensión entregada a la carga.

Los inversores propuestos tienen la capacidad de intercambiar potencia reactiva con la fuente de cc y tomar la tensión de salida como fuente primaria y transferir energía a la parte de corriente continua.

1.7. Planteamiento y resumen de la tesis

El aislamiento eléctrico en fuentes de alimentación cc/ca es sinónimo de seguridad, principalmente en aquellas aplicaciones en donde la fuente de corriente continua se conecta a una carga doblemente alimentada, es decir, que además de contar con la alimentación a partir de corriente continua también reciba alimentación de la línea de corriente alterna. Las aplicaciones más características que requieren aislamiento eléctrico son los sistemas de alimentación fotovoltaicos y los sistemas de alimentación ininterrumpida.

En el caso particular de tener baterías como fuente de alimentación además del aislamiento eléctrico es de gran importancia contar con un convertidor procesador de potencia con capacidad de flujo de potencia en ambos sentidos; del lado de corriente continua al lado de corriente alterna y viceversa. Esta característica de bidireccionalidad permite, por un lado, aprovechar la energía reactiva debida a la característica particular de la carga y retornarla a la batería o bien aprovechar la fuente de energía alterna y realizar la carga de baterías.

Asimismo, y como aspecto fundamental en convertidores de potencia, es necesario tener presente el rendimiento y el coste del convertidor.

Este trabajo de tesis pretende contribuir al análisis y síntesis de inversores con aislamiento eléctrico, bidireccionales, y mayor rendimiento tratando de compensar la elevación del coste.

Para obtener la máxima densidad de potencia y disminuir al máximo el coste del transformador de aislamiento se utiliza el concepto de transformador trabajando a alta frecuencia. Asimismo no se utiliza filtro de corriente continua intermedio debido a la utilización de inversores del tipo bidireccional. Además, como parte fundamental de este trabajo se introduce una nueva familia de inversores bidireccionales multinivel con aislamiento en alta frecuencia. Las características positivas inherentes de los inversores bidireccionales multinivel con aislamiento en alta frecuencia son: mayor rendimiento que los convertidores de dos niveles, menor rizado de la corriente por el filtro de salida y menor distorsión armónica en la tensión de salida. La modificación del convertidor de dos niveles hace necesaria la introducción de nuevos dispositivos semiconductores, lo cual incrementa el coste del convertidor, sin embargo esto se plantea compensar mediante la reducción del filtro de salida así como en la elección de los rangos de corriente y voltaje de los dispositivos semiconductores.

Al final de este trabajo también se exploran otros tipos de inversores con aislamiento eléctrico interesantes para aplicaciones de baja potencia.

En este trabajo se introduce una nueva línea de investigación en convertidores cc/ca con aislamiento en alta frecuencia con flujo de potencia bidireccional y salida multinivel, se realiza la síntesis y experimentación de este tipo de

convertidores y se exploran sus posibilidades en términos de rendimiento, distorsión armónica y coste.

En el **primer capítulo** se expone la necesidad de utilizar aislamiento eléctrico en inversores de potencia, se describen algunas aplicaciones que requieren aislamiento ya sea por seguridad o por normativa, se explican las ventajas de utilizar inversores que permitan el flujo de potencia bidireccional y exponen las ventajas de iniciar una nueva línea de investigación en inversores bidireccionales multinivel con aislamiento en alta frecuencia.

En el **segundo capítulo** se propone una metodología para el análisis y síntesis de inversores bidireccionales con aislamiento en alta frecuencia. La metodología incluye, la elección de las topologías a utilizar del lado de cc y del lado de ca, propuesta de estrategias de modulación, propuesta de estrategias de conmutación, modelado y propuesta del sistema de control en lazo cerrado.

En el **tercer capítulo** se aplica la metodología presentada en el capítulo dos a inversores bidireccionales de dos niveles con aislamiento en alta frecuencia. Se detallan aspectos particulares de las estrategias de modulación y de conmutación, se realiza el modelado y se propone una estrategia de control.

En el **cuarto capítulo** se propone una nueva topología de inversor bidireccional multinivel con aislamiento en alta frecuencia basada en las topologías puente completo/medio puente. Se explica el principio de funcionamiento, se plantean dos estrategias de modulación para reducir la distorsión armónica de la tensión de salida y disminuir el rizado de corriente por el filtro pasabajos. Asimismo se explica la estrategia de conmutación, se realiza el modelado y se propone una estrategia de control.

En el **quinto capítulo** se propone una nueva topología de inversor bidireccional multinivel con aislamiento en alta frecuencia basado en las topologías *push-pull*/puente completo. Se presenta el principio de funcionamiento, se proponen estrategias de modulación, se proponen estrategias de conmutación, se realiza el modelado del el inversor y se propone una estrategia de control.

En el **sexto capítulo** se presentan los resultados de simulación y experimentales de los inversores bidireccionales con aislamiento en alta frecuencia de dos niveles y multinivel. Se presentan resultados en lazo abierto y en lazo cerrado tanto en simulación como experimentales. Asimismo se presentan resultados de distorsión armónica total y de rendimiento.

Finalmente, en el **séptimo capítulo** se exponen las conclusiones de este trabajo de tesis, se especifican las principales aportaciones y se proponen líneas de trabajo futuras.

1.8. Objetivos

- **Objetivos Generales**

Asimilar la tecnología de inversores bidireccionales con aislamiento en alta frecuencia.

Proponer y desarrollar nuevas alternativas de inversores bidireccionales con aislamiento en alta frecuencia tipo directo e indirecto, incidiendo en aspectos como: densidad de potencia, rendimiento, coste y volumen. La investigación en este campo se orienta a los sistemas de energía renovable.

- **Objetivos Particulares**

Analizar la tecnología de inversores bidireccionales con aislamiento eléctrico tipo directo e indirecto y su aplicación en sistemas de energía renovable.

Analizar las diferentes alternativas de inversores bidireccionales con aislamiento de alta frecuencia para aplicaciones en conexión a fuentes no convencionales de energía y conexiones a red.

Proponer nuevas alternativas de inversores bidireccionales que mejoren la calidad de voltaje entregado y densidad de potencia.

Analizar las consideraciones de conmutación en inversores de tipo directo y proponer estrategias de modulación y control de los interruptores en lazo abierto y en lazo cerrado.

1.9. Conclusiones

En este capítulo se ha expuesto una panorámica de los inversores bidireccionales con aislamiento en alta frecuencia y sus diferentes aplicaciones a sistemas basados en energías renovables. Estos sistemas requieren del aislamiento eléctrico principalmente por seguridad ya sea en sistemas aislados o en aplicaciones conectadas a la red eléctrica.

Las ventajas de utilizar este tipo de inversores son básicamente la reducción de etapas de conversión y la capacidad de manejar flujo de potencia bidireccional. Asimismo se plantea la conveniencia de explorar una nueva línea de investigación enfocada a inversores bidireccionales multinivel con aislamiento en alta frecuencia. Las características de este tipo de inversores son la reducción del contenido armónico de la tensión de salida, la disminución del tamaño y coste del filtro de salida y el mejoramiento en el rendimiento global del inversor.