

## ESTUDIO DE INVERSORES FOTOVOLTAICOS

C. R. Sánchez Reinoso<sup>1</sup>, D. H. Milone<sup>1</sup>, R. H. Buitrago<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Centro de Investigación en Señales, Sistemas e Inteligencia Computacional (SINC) – Facultad de Ingeniería y Ciencias Hídricas, Universidad Nacional del Litoral - CONICET, Ciudad Universitaria UNL, 3000 Santa Fe, csanchezreinoso@santafe-conicet.gov.ar

<sup>2</sup>Instituto de Desarrollo Tecnológico para la Industria Química (INTEC), Universidad Nacional del Litoral - CONICET, Guemes 3450, 3000 Santa Fe, rbuitre@intec.unl.edu.ar

**RESUMEN:** Este trabajo estudia algunos desarrollos de inversores fotovoltaicos que fueron diseñados para funcionar conectados a la red eléctrica convencional. Tanto los costos globales como por etapas del sistema fotovoltaico han variado en este último tiempo. Las tecnologías empleadas en los generadores fotovoltaicos y en los inversores también ha sufrido muchos cambios. Estos cambios han originado cierta confusión en el momento de diseñar el sistema. Este trabajo hace un estudio de diferentes topologías de inversores con el fin de comprender mejor las características de cada uno y su evolución. Finalmente se realizan algunas recomendaciones sobre el uso de las diferentes tecnologías de acuerdo a su aplicación.

**Palabras clave:** inversores, módulos fotovoltaicos.

### INTRODUCCIÓN

Los sistemas fotovoltaicos conectados a red a la red están cobrando más importancia al mismo tiempo que la potencia demandada está en aumento. Sin embargo, un factor de mucho peso para esas implementaciones es el costo. El precio de los módulos fotovoltaicos fue la mayor contribución al costo del sistema. La tendencia actual también está en el precio del módulo pero esto trae aparejado un interés en el costo de los inversores, ya que la alternativa de inversores integrados a los módulos se piensa redundar en una disminución del costo total del sistema. El inversor realiza la conversión de corriente continua a corriente alterna, pero además está encargado de otras tareas, como por ejemplo la amplificación de la tensión de corriente continua entregada por el módulo y también el seguimiento del punto de máxima potencia. Esto último es necesario debido a que la potencia entregada por el módulo es muy sensible al punto de operación. Además el inversor también debe proporcionar la posibilidad de inyectar energía a la red, con lo que se requiere también prestar especial cuidado al diseño de dicha etapa.

La problemática referida a la topología adecuada del inversor de acuerdo a la tecnología de generador fotovoltaico elegida (Wilk et al., 2002; Schienbein L. et. al, 2001) y la aplicación en particular, lejos de resolverse, es actualmente un problema abierto. Este trabajo comienza con una revisión de diferentes conceptos en inversores fotovoltaicos. Desde grandes áreas de módulos fotovoltaicos conectados a inversores centrales, pasando por inversores no centralizados a los cuales se conectan una menor cantidad de módulos y la tendencia donde existe un inversor por módulo. Posteriormente se realizan caracterizaciones de los inversores fotovoltaicos atendiendo a distintos criterios y finalmente se resumen las conclusiones.

### CONCEPTOS EN INVERSORES

#### *Inversor central*

La tecnología de inversor central está basada en la conexión de un gran número de módulos (Calais et al., 2002). Los módulos fotovoltaicos son conectados en serie de acuerdo a la tensión requerida. Estos módulos conectados en serie son conectados en paralelo, mediante diodos, con la finalidad de conseguir mayor potencia. Los inversores centrales incluyen diferentes limitaciones, tales como el alto voltaje del cableado de corriente continua entre los módulos y el inversor, pérdidas de potencia debido al seguimiento del punto de máxima potencia centralizado, pérdidas debidas a la disparidad de la salida entre los módulos conectados, pérdidas en los diodos, y un diseño no flexible donde los beneficios de la producción en serie no pueden ser conseguidos. La etapa de conexión a red fue usualmente realizada mediante el empleo de tiristores, consiguiendo muchos armónicos de corriente y baja calidad de potencia. La gran cantidad de armónicos fue la ocasión de emplear nuevas topologías de inversores y diseño de sistemas, con la finalidad de cumplir con los nuevos estándares de calidad de potencia.

### *Inversores de cadena y multi-cadena*

Actualmente se dispone de la tecnología de inversores de cadena y multi-cadena (Calais et al. 2002). Los inversores de cadena son una versión reducida del inversor central, donde una única cadena de módulos fotovoltaicos es conectada al inversor (Verhoeven et al. 1998). El voltaje de entrada puede ser lo suficientemente alto como para evitar la amplificación de tensión. Esto requiere una asociación de módulos fotovoltaicos en serie cuya tensión total de circuito abierto sea de unos 750 V, que solicitan a dispositivos conmutadores de potencia tales como transistores bipolares de compuerta aislada y permiten que operen dentro de su capacidad. Sin embargo, la tensión de operación normalmente es del orden de los 500 V, lo cual también ayuda al buen funcionamiento del seguidor del punto de máxima potencia (MPPT). La posibilidad de usar pocos módulos en serie también existe, si un convertidor de corriente continua o un transformador a la frecuencia de línea es usado para la amplificación de tensión. No hay pérdidas asociadas con los diodos de cadena y seguidores del punto de máxima potencia separados pueden ser aplicados a cada cadena. Esto aumenta la eficiencia global del sistema comparado con el inversor central, y se reduce el precio, debido a la producción en serie.

Los inversores multi-cadena son concebidos a partir del concepto de los inversores de cadena, donde diferentes cadenas con su convertidor de corriente continua se conectan a un inversor común (Verhoeven et al., 1998; Meinhardt y Cramer, 2000). Esto es beneficioso comparado con el sistema centralizado, dado que la energía de cada cadena es controlada individualmente. Este tipo de inversores permite comenzar con un sistema fotovoltaico con pocos módulos y realizar ampliaciones relativamente fácil, debido a que una nueva cadena con su convertidor de corriente continua puede ser conectado al sistema principal. De esta manera se puede obtener un diseño flexible con alta eficiencia.

### *Módulos de corriente alterna y celdas de corriente alterna*

Los módulos denominados de corriente alterna integran el módulo y el inversor en un solo dispositivo (Calais y Agelidis, 1998; Meinhardt et al., 1999; Schienbein L. et. al, 2001). Tiene algunas funciones básicas como la de elevar y transformar la tensión de corriente continua generada por las celdas, y realizar el seguimiento del punto de máxima potencia intentando mantener la máxima eficiencia posible dentro del rango de potencia del módulo para diferentes condiciones climáticas y de carga.

Existen muchas variantes de las topologías de inversor empleadas en este caso, algunas con alta frecuencia de conmutación (Watanabe et al., 1998; Peng y Lai, 1997; Meinhardt et al., 1999; Lohner et al., 1996) y otras conmutadas por red (Haan et al., 1994; Saha y Sundarsingh, 1996; Oldenkamp y Jong, 1998).

Los beneficios de la solución conmutada por red son que las pérdidas de conmutación son completamente eliminadas y solo permanecen las pérdidas en conducción. En la actualidad se emplean ampliamente inversores autoconmutados dentro de los módulos integrados, lográndose una buena calidad de potencia.

En general, se puede decir que el concepto de módulo de corriente alterna elimina las pérdidas por disparidad en la salida entre los módulos fotovoltaicos dado que existe solo un módulo fotovoltaico, como así también soporta el ajuste óptimo entre el módulo fotovoltaico y el inversor, y por lo tanto del MPPT individual. Esto incluye la posibilidad de una fácil ampliación del sistema debido a su estructura modular. Además, este dispositivo puede ser usado por personas con pocos conocimientos de instalaciones eléctricas, ya que se encuentra totalmente integrado y listo para funcionar.

En otro orden de cosas, la necesaria alta amplificación de tensión puede reducir la eficiencia global del sistema e incrementar el precio por unidad de potencia, debido a la mayor complejidad de las topologías del circuito. Otro aspecto a tener en cuenta es que el módulo de corriente alterna está pensado para ser producido en serie, lo cual lleva a un bajo costo de fabricación y también a un bajo precio minorista.

Finalmente, las celdas de corriente alterna consisten en una gran celda fotovoltaica conectada a un sistema inversor (Wilk et al., 2002; Riatsch et al., 1997). El principal cambio para los diseñadores es desarrollar un inversor que pueda amplificar los muy bajos voltajes 0.5-1 V con potencias del orden de los 100W por metro cuadrado, hasta el nivel de tensión de red, y al mismo tiempo conseguir alta eficiencia. Esto implica la investigación y desarrollo de nuevos conceptos de convertidores que satisfagan lo mejor posible estos requerimientos.

## **CARACTERIZACIÓN DE INVERSORES**

A continuación se realiza una clasificación de diferentes tecnologías de inversores. La topologías están categorizadas sobre la base del número de etapas de potencia, ubicación de los capacitores de desacople, empleo o no de transformadores, y tipo de etapa de conexión con la red.

### *Cantidad de etapas de potencia*

Según la cantidad de etapas empleadas en la conversión de potencia, los inversores pueden dividirse en inversores de una etapa o de múltiples etapas.

El inversor de una etapa realiza múltiples tareas; seguimiento del punto de máxima potencia, control de corriente de red, control de amplificación de tensión. Esta es la configuración típica del inversor central, con todos los problemas asociados con ella. El inversor debe ser diseñado para manejar una potencia de pico del doble de la potencia nominal.

En los inversores de dos etapas, el convertidor de corriente continua es el encargado de realizar el seguimiento del punto de máxima potencia y tal vez la amplificación de tensión. Dependiendo del control del inversor, la salida de los convertidores DC-DC es una tensión de corriente continua pura y el convertidor se diseña para soportar la potencia nominal, ó la corriente de salida del convertidor es modulada y el convertidor debe manejar una potencia pico de dos veces la potencia nominal. El inversor es una de las primeras soluciones controlando la corriente de red por medio de modulación por ancho de pulso o bien mediante banda de histéresis. En este último caso, el inversor es conmutado a la frecuencia de línea, y el convertidor de corriente continua se ocupa del control de la corriente. Dicho esquema permite obtener una alta eficiencia si la potencia nominal es baja. Por otro lado, es aconsejable operar el inversor conectado a red mediante modulación por ancho de pulso si la potencia nominal es alta.

Finalmente, en el inversor multi-cadena la única tarea para cada convertidor de corriente continua es el seguimiento del punto de máxima potencia y tal vez la amplificación de tensión. Los convertidores DC-DC son conectados al enlace de corriente continua de un inversor común, el cual se encarga del control de la corriente de red. Esto lleva a que se consiga un mejor control de cada serie o cadena fotovoltaica.

#### *Desacople de potencia*

El desacople de potencia normalmente se lleva a cabo mediante un capacitor electrolítico. Este componente es el principal factor limitante de la vida útil. Por lo tanto, debe mantenerse tan pequeño como sea posible y preferiblemente sustituirse por condensadores laminados. El condensador se coloca en paralelo con los módulos fotovoltaicos o en el enlace de DC entre las etapas del inversor. El tamaño del capacitor de desacople depende en forma directamente proporcional a la potencia nominal de los módulos fotovoltaicos e inversamente a la frecuencia, a la tensión media del condensador y a la amplitud del rizado.

Esa relación está basada en el hecho que la corriente entregada por los módulos fotovoltaicos es una continua pura, y que la corriente de un inversor fotovoltaico conectado a red sigue una forma de onda senoidal cuadrática de la frecuencia de red, asumiendo una tensión media del condensador constante.

Por lo tanto dependiendo de la ubicación del condensador, si está conectado en paralelo a los módulos o en el enlace de corriente continua, resultará el valor adecuado para el mismo.

#### *Transformadores*

Algunos inversores usan transformadores de alta frecuencia integrados, algunos un transformador a la frecuencia de línea hacia la red, y otros inversores no incluyen transformador. El transformador a la frecuencia de línea no es considerado un componente deseable debido a su tamaño, peso y precio. Los inversores modernos tienden a utilizar un transformador de alta frecuencia. Esto da lugar a diseños completamente nuevos, tales como componentes magnéticos integrados en placas de circuitos impresos (Meinhardt, 1999).

El criterio de la inclusión del transformador resulta a veces no muy claro dentro de los inversores fotovoltaicos. El sistema de puesta a tierra de los módulos fotovoltaicos no es requerido, siempre y cuando la máxima tensión de salida sea menor a 50 V. Por otro lado, es difícil lograr alta eficiencia en la amplificación de tensión sin un transformador, cuando la tensión de entrada esté en el rango de 20-48 V. También el transformador es innecesario cuando la tensión de entrada es suficientemente alta.

Un inversor de tipo puente completo convencional no puede ser usado como interface de red cuando tanto la entrada como salida están puestas a tierra. Además, el gran área de los módulos fotovoltaicos incluye una capacitancia del orden de una fracción hasta unos pocos nanofaradios por módulo a tierra (Calais et al., 2002). Esto puede también causar severas oscilaciones entre los módulos fotovoltaicos e inductancias del circuito. Solo se conocen unas pocas topologías sin transformador de alta tensión de entrada en las que pueden ser puestas a tierra tanto la entrada como la salida

#### *Conexión a la red*

Existen diferentes topologías de inversores conectados a la red. Una es la de inversores fuentes de corriente conmutados por frecuencia de línea. Dada la corriente modulada, el circuito debe encargarse de reconstruir la onda senoidal e inyectarla a la red. Los circuitos aplican conmutación por tensión cero y conmutación por corriente cero, por lo tanto solo permanecen las pérdidas en conducción. Dado que la corriente debe ser modulada por otra etapa, dicha etapa debe ser diseñada para una potencia pico del doble de la nominal, y el desacople de potencia se debe conseguir con un capacitor en paralelo con los módulos. Se pueden emplear una topología contrafase con un transformador con un solo devanado secundario, o uno en retroceso con dos devanados secundarios dependiendo del circuito.

Otra topología es la del inversor fuente de tensión de puente completo estándar, la cual puede crear una corriente de red senoidal por aplicación del positivo o negativo enlace de continua ó por tensión cero a la red y al inductor de red. El voltaje sobre la red y el inductor es frecuentemente modulada por ancho de pulso, pero también puede aplicarse un control de corriente por banda de histéresis. Una variante a la topología descrita anteriormente es la del inversor fuente de tensión binivel de medio puente, a partir de la cual sólo se pueden obtener dos tensiones diferentes y requiere un doble enlace de

tensión de corriente continua y doble frecuencia de conmutación con el fin de obtener la misma performance que con el puente completo.

Existen también topologías de inversores fuentes de tensión de tres y más niveles de medio puente con diodo de enclavamiento. Estas topologías multinivel, pueden producir distintas tensiones sobre la red y el inductor. Estas topologías son beneficiosas dado que la frecuencia de conmutación de cada transistor puede ser reducida y, además se asegura una potencia de mejor calidad.

Las señales de control para los transistores en los inversores fuentes de tensión y la referencia para la forma de onda de la corriente de red son mayormente basados en la medición de la tensión de red o detección del cruce por cero. Esto puede resultar en graves problemas con la calidad de potencia e innecesarias situaciones de falla. De acuerdo a (Enslin y Heskes, 2003), la principal razón para estos problemas son los armónicos de tensión y un diseño inadecuado. Los armónicos pueden iniciar resonancia serie con los capacitores colocados cerca de la red, debido a la retroalimentación de la corriente del inversor o una señal ruidosa en la detección de cruce por cero. Una solución a este problema es usar un lazo de enganche de fase para establecer una referencia de forma de onda de corriente de alta calidad.

## CONCLUSIONES

En la primera parte de la revisión se realizó un resumen de los diferentes conceptos en los que se basan los inversores fotovoltaicos. En los inversores centrales grandes áreas de módulos fotovoltaicos son conectados al mismo. Esto tiene inconvenientes que posibilitaron la aparición de los inversores de cadena. El incremento en la cantidad de cadenas, cada uno con un convertidor de corriente continua y un seguidor del punto de máxima potencia individual, conectados a un inversor común, originó el concepto de los inversores multi-cadena. Otra innovación en este campo es la aparición de módulos de corriente alterna, donde cada módulo es conectado a la red mediante su propio inversor.

Posteriormente se realizó una clasificación de los inversores de acuerdo a la cantidad de etapas de potencia, tipo de desacople de potencia entre el módulo fotovoltaico y la red, transformadores y etapa de conexión con la red. Las conclusiones partir de las clasificaciones son las siguientes:

En los casos en los que la tensión de entrada es suficientemente alta para eliminar la necesidad de amplificación pueden emplearse grandes inversores centrales de una etapa. El inversor de doble etapa puede ser adecuado para la amplificación de tensión requerida por módulos y celdas de corriente alterna. Por último, si diferentes cadenas van a ser conectados a la red, es conveniente el empleo de un inversor multi-cadena.

Es innecesario trasladar el condensador de desacople desde la entrada del inversor al enlace de DC, cuando los módulos fotovoltaicos están conectados en serie para conseguir un alto voltaje para el inversor. Por otra parte, en el caso del módulo y celdas de corriente alterna, la ubicación preferible para el capacitor es en el enlace de corriente continua donde la tensión es alta y se puede permitir fluctuación. Los capacitores electrolíticos deben ser reemplazados por condensadores laminados para aumentar la fiabilidad, pero esto también implica un precio más alto, especialmente para inversores de alta potencia, donde se requiere una gran capacitancia.

Los transformadores de alta frecuencia deben ser aplicados para la amplificación de la tensión cuando se emplean módulos y celdas de corriente alterna. También es beneficioso incluir este tipo de transformadores en sistemas más grandes con la finalidad de evitar la resonancia entre los módulos fotovoltaicos y la inductancia en los principales circuitos de corriente. La resonancia puede, sin embargo, también ser mitigada con topologías de inversores que soporten puesta a tierra de los terminales de entrada y de salida. El esquema de doble puesta a tierra es también un requerimiento solo en algunos países.

Los inversores fuente de corriente de frecuencia de línea son adecuados para baja potencia, por ejemplo para aplicaciones con módulos de corriente alterna. Por otro lado, un inversor fuente de tensión de alta frecuencia es adecuado tanto para sistemas de baja como de alta potencia.

## REFERENCIAS

- Enslin J. y Heskes P. (2003). Harmonic interaction between a large number of distributed power inverters and the distribution network. Proc. of IEEE PESC 03, 4, 1742–1747.
- Calais M., Myrzik J., Spooner T. and Agelidis V. (2002). Inverters for single-phase grid connected photovoltaic Systems-An overview. Proc. of IEEE PESC 02, 2, 1995–2000.
- Calais M. y Agelidis V. (1998). Multilevel converters for single-phase grid connected photovoltaic Systems – an overview. Proc. of IEEE ISIE 98, 1, 224-229, Sudáfrica.
- Haan S. et al. (1994), Test results of a 130 W AC module; a modular solar ac power station. Proc. of IEEE 1st WCPEC, 925-928, Estados Unidos.
- Lohner A. et al. (1996). A new panel-integratable invertir concept for grid-connected photovoltaic Systems , Proc. of IEEE ISIE' 96, 2, 827-831, Polonia.
- Meinhardt M. et al. (1999), Miniaturised low profile module integrated converter for photovoltaic applications with integrated magnetic components. Porc. Of IEEE APEC 99, 1, 305-311, Estados Unidos.

- Meinhardt M. y Cramer G. (2000). Past, present and future of grid connected photovoltaic- and hybrid-power-systems. Proc. of IEEE-PES Summer Meeting, 2, 1283–1288.
- Meinhardt M. et al. (1999). Miniaturised low profile module integrated converter for photovoltaic applications with integrated magnetic components. Proc. of IEEE APEC 99, 1,305–311.
- Oldenkamp H. y Jong I. (1998). AC modules: past, present and future. Proc. of workshop installing the solar solution, Reino Unido.
- Peng F. y Lai J. (1997). Multilevel cascade voltage source inverter with separate dc sources. US patent number: 5,642,275.
- Riatsch J. et al. (1997). Single cell module integrated converter system for photovoltaic energy generation. Proc. of EPE'97, 1, 71-77, Noruega.
- Saha S. y Sundarsingh V. (1996). Novel grid-connected photovoltaic inverter. Proce of IEE Generation, Transmission and Distribution, 143, 2, 219-224.
- Schienbein L. et. al. (2001). Step wave power converter. US patent number 6, 198,178.
- Verhoeven B. et al.. (1998). Utility Aspects of Grid Connected Photovoltaic Power Systems. International Energy Agency Photovoltaic Power Systems, IEA PVPS T5-01.
- Watanabe H. et al. (1998). A novel utility Interactive photovoltaic inverter with generation control circuit. Proc. of IEEE 24th IECON, 2, 721-725, Alemania.
- Wilk H. et al. (2002). Innovative electrical concepts. International Energy Agency Photovoltaic Power Systems, IEA PVPS 7-07.

## ABSTRACT

In this paper is studied some developments of inverters designed to operate as grid PV inverters. The overall costs and each of the PV system stages have changed in recent times. The technologies used in the photovoltaic generators and inverters have also undergone many changes. These ones have caused some confusion at the time of designing a system. This work is a study of different topologies of inverters, in order to understand better its characteristics and evolution. Finally, it is given some recommendations on the use of different technologies according to the application.

**Keywords:** inverters, photovoltaic modules.