



Conversión sigma-delta aplicada al control de inversores resonantes

Lesyani León
Juan A. Gutiérrez

Recibido: octubre del 2005
Aprobado: diciembre del 2005

Resumen / Abstract

Se realiza un estudio sobre la conversión sigma-delta aplicada al control de inversores de enlace de continua resonantes. Este tipo de configuración inversora (inversor resonante con enlace CD) es factible de utilizar como parte integrante de un sistema fotovoltaico de energía porque presenta la ventaja de que todos los elementos conmutan a tensión o corriente cero, tanto los elementos de alta frecuencia como los que actúan de inversor, sin necesidad de modular la tensión de continua, lo cual simplifica considerablemente el lazo de control. La conversión análoga digital es una etapa clave en la mayoría de los sistemas electrónicos modernos. Una vez, en formato digital, las señales pueden ser fácilmente almacenadas y procesadas para obtener la información deseada.

Palabras clave: conversión sigma-delta

This paper presents an analysis of the sigma-delta conversion applied to the control of the DC link resonant inverters. This inverter configuration is often employed as a part of photovoltaic system because it presents the advantage that the semiconductor elements commute at zero tension or zero current. It happens on the high frequency elements and the inverter elements, and it is not necessary to modulate the DC tension, condition that simplified the control loop. Conversion analog-digital is an important step of the almost every modern electronics systems. After the signal is translated to the digital format, it can be processed easily in order to obtain the required information.

Key words: sigma-delta conversion

INTRODUCCIÓN

En los convertidores electrónicos de potencia, uno de los mecanismos que afecta a las pérdidas en los semiconductores que forman parte del convertidor son las debidas a la conmutación. Estas pérdidas son proporcionales a la frecuencia de conmutación y, como es sabido, el aumento de frecuencia es importante en la implementación de determinadas aplicaciones para conseguir una mejora de las características de salida.¹

En los convertidores tradicionales PWM pueden reducirse estas pérdidas con el uso de redes de ayuda

a la conmutación, ya que consiguen que la tensión y la corriente coexistan el mínimo tiempo posible en el proceso de conmutación. Estas redes presentan fundamentalmente dos problemas: el primero es que limitan la frecuencia de conmutación a un máximo determinado debido a sus características de funcionamiento; el segundo es la adición de semiconductores que añaden a las pérdidas propias del conmutador principal las de conducción de sus elementos semiconductores.

La idea de hacer que no coexista la tensión y la corriente en el proceso de conmutación se puede poner

en práctica mediante un circuito resonante LC, donde la corriente o la tensión sean cero en el momento de la conmutación del conmutador principal. De esta forma las pérdidas por conmutación desaparecen de la suma total de pérdidas del convertidor y entonces se está en presencia de un convertidor de pulso resonante.

Existen distintas configuraciones que permiten conseguir el cero de corriente o de tensión, siempre basándose en el circuito resonante LC.

Una configuración derivada de los convertidores denominados cuasiresonantes, los que son configuraciones convencionales PWM en la que circuitos resonantes asociados a los conmutadores permiten conmutaciones a tensión o corriente cero y que es específica de los inversores, es la llamada de enlace de continua resonante, la cual asume que la tensión continua con la que se alimenta el inversor forma parte de un bus de continua que proviene de la rectificación de una señal alterna (mono o trifásica).

DESARROLLO

La energía generada por un campo fotovoltaico se presenta en forma de corriente continua, por lo que es necesario convertirla en una tensión alterna para utilizarla en sistemas aislados o para inyectarla en la red eléctrica. (Ver figura 1.)

El convertidor electrónico encargado de la conversión a corriente alterna es el inversor, normalmente puede utilizarse la SPWM (modulación senoidal del ancho de pulso).

La tensión generada por este convertidor presenta una serie de armónicos que dependen de la técnica de modulación empleada y de la frecuencia de la portadora.

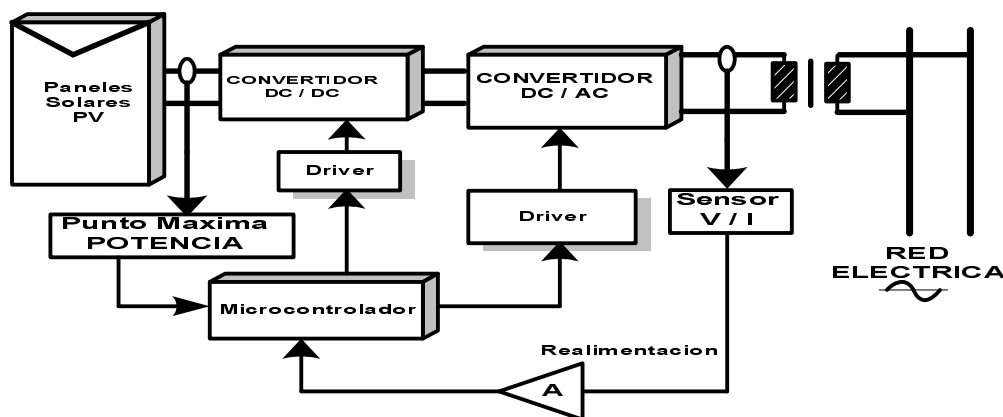
Idealmente, la frecuencia de la portadora puede aumentarse lo necesario para que los armónicos de menor orden se encuentren en frecuencias elevadas y el número de pulsos por medio ciclo dependan de la frecuencia de la portadora. En la práctica, el proceso de conmutación de los interruptores electrónicos hace que la potencia perdida en conmutación sea proporcional a la frecuencia de conmutación.

La solución para este inconveniente es forzar la conmutación cuando la tensión o la corriente en el conmutador sean cero, lo que puede lograrse con el empleo de redes Snubber para conmutaciones suaves o con transiciones resonantes (resonancia en la carga o en el conmutador). La utilización de las redes Snubber limitan la frecuencia máxima de utilización. En la resonancia por carga, la estabilidad del sistema depende de la carga y no son aptos para generar baja frecuencia. En el caso de los cuasiresonantes, el número de elementos pasivos empleados puede ser muy elevado (pérdidas).

Todas las aplicaciones en las que se utilizan inversores PWM (amplificadores de potencia, audio, interfaces fotovoltaicos, etc.) pueden mejorarse utilizando técnicas cuasiresonantes, en particular la técnica de conmutación a corriente cero. La gran tensión que soporta el dispositivo de conmutación cuando se usa la técnica de conmutación a tensión cero (con niveles de hasta 8 veces la fuente de tensión de entrada) limita las aplicaciones en este campo. Afortunadamente la gran corriente que atraviesa el conmutador con la conmutación a corriente cero presenta menores problemas.

En la figura 2 aparece la característica voltaje - corriente de una celda fotovoltaica.

Como se deduce del análisis de dicha figura, únicamente puede extraerse potencia del dispositivo si el punto de trabajo está situado en el cuarto cuadrante, que es donde el producto tensión por



Esquema de un sistema fotovoltaico conectado a la red eléctrica.

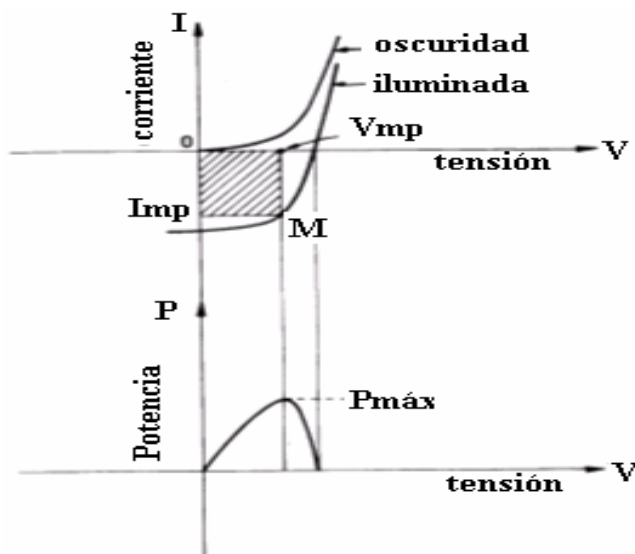
corriente es negativo, lo que significa que la célula solar se comporta como generador de energía. También se representa la potencia generada en función de la tensión y se puede apreciar la presencia de un máximo. Evidentemente, la resistencia de carga debe ser elegida de forma que el punto de trabajo coincida con el punto de potencia máxima.

Para obtener la máxima energía posible del panel es necesario disponer de una impedancia variable que fuerce en todo instante al panel solar a trabajar en el punto de máxima potencia de la curva característica correspondiente.

Resulta evidente que la carga conectada al sistema tiene un valor propio y variará según las necesidades concretas del consumo que no tienen porqué coincidir con la impedancia requerida para la máxima potencia. Por consiguiente, solo queda la alternativa de disponer en la salida, de un dispositivo que simule a partir de ella y mediante el procedimiento adecuado, una impedancia variable vista desde el panel.

El fundamento teórico para conseguirlo consiste en un conmutador electrónico que se accione varios cientos o miles de veces por segundo, de forma que la impedancia efectiva vista desde el panel, puede variarse en función de la relación de tiempos de conexión-desconexión del conmutador.

Con una tensión de entrada lo suficientemente alta, la configuración idónea es la del inversor de enlace resonante, en cualquiera de sus configuraciones. Presentan la ventaja de que todos los elementos conmutan a tensión o corriente cero² (tanto los elementos de alta frecuencia como los que actúan de inversor) sin necesidad de modular la tensión de continua, lo cual simplifica considerablemente el lazo de control.



Característica voltaje - corriente de una celda fotovoltaica.

Otra posible ventaja (sería necesario un estudio riguroso) es la eliminación del sistema de seguimiento del punto de máxima potencia de los paneles solares, ya que con un control adecuado, esta misión podría cumplirla la parte del circuito que permite la conmutación a tensión cero de los conmutadores del puente inversor.

Algo importante a tener en cuenta cuando se trata de inversores es el manejo de cargas reactivas. El grado en el cual los inversores, necesitan alimentar cargas reactivas va desde prácticamente nada o muy pequeñas, como es el caso de los SAI para pequeños valores, computadoras, hasta valores de factor de potencia muy pobres como en los sistemas fotovoltaicos (autónomos o aislados).

Esta configuración tiene las siguientes características:

- Limita la tensión a la del enlace, produciendo instantes de tensión cero.
- Proviene de los circuitos de bloqueo de los inversores a base de tiristores.
- Para no tener muchas pérdidas, el condensador de filtro se desconecta y es C_r el que baja la tensión a cero.
- Los instantes de tensión cero pueden elegirse con cierta libertad (dentro de unos límites).

Técnicas de modulación

El principal beneficio de los conmutadores cuasiresonantes es que la conmutación se puede realizar en los momentos de corriente cero o de tensión cero,³ reduciendo las pérdidas de conmutación asociadas. Como la forma de onda de la resonancia es periódica (normalmente se hace una senoidal) el intervalo entre operaciones de conmutación es fijo a la frecuencia del enlace de continua resonante. La forma de onda se debe componer en ese caso de pulsos discretos.

Esta característica significa que se deberán establecer técnicas de modulación donde el PWM no sea posible. Sin embargo, se pueden utilizar una serie de estrategias denominadas colectivamente modulación delta. Dichas técnicas incluyen la modulación sigma-delta. Esta última es particularmente útil en la electrónica de potencia.

Modulación sigma-delta

El diagrama de bloques de un modulador sigma-delta se muestra en la figura 3.

La diferencia entre la tensión de salida y la tensión de entrada (e) sirve de entrada a un integrador que produce la señal integrada del error E y esta es la entrada de un cuantificador que produce una magnitud de salida fija de $-V_c$ o $+V_c$ que se mantiene gracias a la acción de un circuito de muestreo y retención que opera a la frecuencia f_i (la frecuencia del enlace).

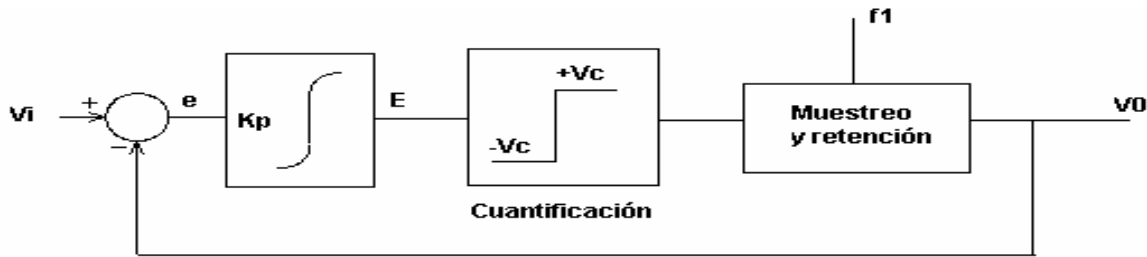


Diagrama de bloques de un modulador sigma- delta.

3

La forma de onda de salida se compone de pulsos de una magnitud V_c y un periodo $T_1=1/f_1$. Esta salida es realimentada para producir la señal de error. La acción del modulador sigma-delta es balancear la integral de la entrada y la salida. Se puede aplicar el mismo principio para generar pulsos senoidales en lugar de pulsos cuadrados.

Comparación entre la modulación sigma-delta y el PWM

Está comprobado que con una frecuencia de enlace 4 o 5 veces la correspondiente portadora del PWM, la distorsión armónica total (THD) producida por la modulación delta es comparable o mayor que la del PWM.

$$THD = \frac{\sqrt{\sum_{n=1, n \neq p} \left(\frac{V_n}{n/p} \right)^2}}{V_p}$$

donde:

V_n : Magnitud de la componente a una frecuencia n veces mayor que la menor frecuencia generada.

V_p : Magnitud de la componente de salida a la frecuencia de la modulación de entrada.

El THD de la modulación delta es menor en todos los índices de modulación para frecuencias de enlace entre 4 y 10 veces la frecuencia de la portadora del PWM.

El espectro del PWM está compuesto por bandas laterales centradas alrededor de los múltiplos de la frecuencia de la portadora. En la zona de bajas frecuencias se generan unos pocos armónicos. Esto contrasta con la modulación delta donde se generan armónicos de una magnitud sustancial a lo largo de todo el espectro, llegando hasta el rango de la baja frecuencia.

CONCLUSIONES

En el trabajo se realiza una propuesta de conmutación sin pérdidas utilizando una configuración inversora resonante como parte integrante de un sistema fotovoltaico de energía.

La conmutación sin pérdidas permite aumentar la frecuencia de conmutación, por lo que se puede

conseguir reducir el tamaño de los elementos reactivos, con la consiguiente miniaturización del convertidor y el aumento de la densidad de potencia, lo que resulta importante en algunas aplicaciones.

Cualquiera de las configuraciones de inversores resonantes pudieran utilizarse para este propósito, pero se propone como la configuración más idónea la del inversor de enlace resonante de CD, ya que presentan la ventaja de que todos los elementos conmutan a tensión o corriente cero, sin necesidad de modular la tensión de continua, lo cual simplifica considerablemente el lazo de control.

La utilización de sistemas fotovoltaicos de energía conectados a la red eléctrica es una de las fuentes no convencionales de energía que puede ser aprovechada en Cuba dentro del contexto de la generación distribuida.

REFERENCIAS

1. Mohan, N.; T.M. Undeland and W.P. Robbins: *Power Electronics: Converters, Applications and Design*, John Wiley and Sons, New York, 1995.
2. Finney, S. J.; T.C. Green and B.W. Williams: "Review of Resonant Link Topologies for Inverters", *IEE Proceedings-B*, Vol. 140, 2, pp. 103-114, March, 1993,
3. Lee, F. C.; W. A. Tabisz, and M. Jovanovic: "Convertidores cuasi y multiresonantes. Ventajas y limitaciones", *Mundo Electrónico*, No. 200, pp. 307-321, Nov., 1989.

AUTORES

Lesyani León Viltre

Ingeniera Electricista, Máster en Ingeniería Eléctrica, Asistente, Departamento de Electroenergética, Facultad de Ingeniería Eléctrica, Universidad Central de Las Villas, Marta Abreu, Villa Clara, Cuba
e-mail:lesyani@uclv.edu.cu

Juan A. Gutiérrez Fernández

Ingeniero Electricista, Instructor, Departamento de Electroenergética, Facultad de Ingeniería Eléctrica, Universidad Central de Las Villas, Marta Abreu, Villa Clara, Cuba
e-mail:juani@uclv.edu.cu