

Sistema fotovoltaico multifuncional conectado a la red eléctrica controlado por medio de modos deslizantes

Iván Méndez

Instituto Tecnológico de Celaya, Celaya, Gto., México, Teléfono: (461) 611 7575

Nimrod Vázquez

Instituto Tecnológico de Celaya, Celaya, Gto., México, Teléfono: (461) 611 7575

n.vazquez@ieee.org

Claudia Hernández

Instituto Tecnológico de Celaya, Celaya, Gto., México, Teléfono: (461) 611 7575

Héctor López

Instituto Tecnológico de Celaya, Celaya, Gto., México, Teléfono: (461) 611 7575

Joaquín Vaquero

Universidad Rey Juan Carlos, Móstoles, Madrid, España

joaquin.vaquero@urjc.es

Resumen

Debido al uso de cargas electrónicas no lineales, la calidad de la energía eléctrica se ha ido deteriorando. Con el creciente uso de fuentes renovables de energía interconectadas a la red eléctrica es posible integrar la función de los filtros activos de potencia a los sistemas fotovoltaicos (PV, por sus siglas en inglés) conectados a la red, modificando el control del convertidor. Debido a lo antes mencionado en este trabajo se propone el uso de un sistema PV controlado por medio de modos deslizantes, con una superficie deslizante capaz de inyectar tanto potencia activa como reactiva para eliminar

los armónicos de corriente en el punto de acoplamiento común (PAC) y mantener un factor de potencia elevado aún ante la presencia de cargas no lineales, con la ventaja de una fácil implementación.

El sistema es diseñado y simulado, con lo cual se confirma la eficacia del controlador por modos deslizantes propuesto. Además se mencionan las ventajas sobre los inversores PV convencionales.

Palabra(s) Clave(s): control por modos deslizantes, inversor fotovoltaico, potencia activa, superficie de deslizamiento.

1. Introducción

Hoy en día con la creciente demanda de energía eléctrica y haciendo frente a problemas como el aumento de los precios y la escasez de recursos naturales no renovables, como el gas natural, el petróleo, etc., los investigadores se han dado a la tarea de encontrar nuevas fuentes que puedan satisfacer las necesidades energéticas actuales; esto ha permitido soluciones complejas e innovadoras con características deseables, tales como una mayor eficiencia, más potencia y menos contaminación al momento de la generación de energía [1]. Los paneles solares (térmica, fotovoltaica), sistemas eólicos, entre otros, son el resultado de esta búsqueda.

Otra cuestión importante es el interés en la calidad de la energía, que surge de la utilización de cargas no lineales por los consumidores residenciales, comerciales e industriales, debido a que este tipo de cargas generan un alto contenido de armónicos en la red. Cuando los armónicos de corriente generados por las cargas no lineales interactúan con la impedancia de la red aparecen armónicos de voltaje que afectan a todos los usuarios conectados al PAC.

Entre los problemas causados por la presencia de armónicos de corriente está la distorsión de la tensión, elevada corriente por el neutro, sobrecalentamiento de transformadores, calentamiento de conductores, mal funcionamiento de los interruptores y fusibles, operación errónea de los equipos electrónicos, reducción de

vida útil en lámparas incandescentes, riesgo de resonancia en lámparas fluorescentes, sobrecalentamiento de máquinas rotativas, etc. [2]. Se han propuesto filtros activos [3-5], los cuales a pesar de ser buenos sistemas de compensación tienen la desventaja de ser muy costosos.

Con la generación distribuida (DG) es posible utilizar la flexibilidad de control del inversor no sólo para generar energía activa desde el sistema PV, sino también para compensar los armónicos de corriente producidos por las cargas no lineales. En la literatura se han propuesto algunos trabajos que consideran la multifunción de los inversores [6-9]. En [6] se propone el uso de tanques resonantes que son capaces de eliminar eficazmente los armónicos seleccionados, pero con la desventaja de que necesita tantos tanques resonantes en paralelo como armónicos se deseen eliminar. La teoría de la potencia reactiva instantánea también se ha utilizado en [7-8], sin embargo sólo es aplicable a los sistemas trifásicos; y adicionalmente en [9] se utiliza la teoría del marco de referencia síncrona, este método también es aplicable únicamente a los sistemas trifásicos, por lo cual si se desea utilizar en un sistema monofásico se requieren señales virtuales.

En este trabajo es propuesto un controlador diferente basado en modos deslizantes. El sistema consta de un sistema PV monofásico de dos etapas (Fig. 1). El convertidor es capaz de inyectar tanto potencia activa como reactiva y compensar corrientes armónicas en el PAC, con las ventajas de ser de fácil implementación por el control por modos deslizantes y sin la necesidad de muchos recursos computacionales en comparación con otras técnicas discutidas anteriormente. Además no necesita de un lazo de control independiente como en [6] para generar la señal de referencia.

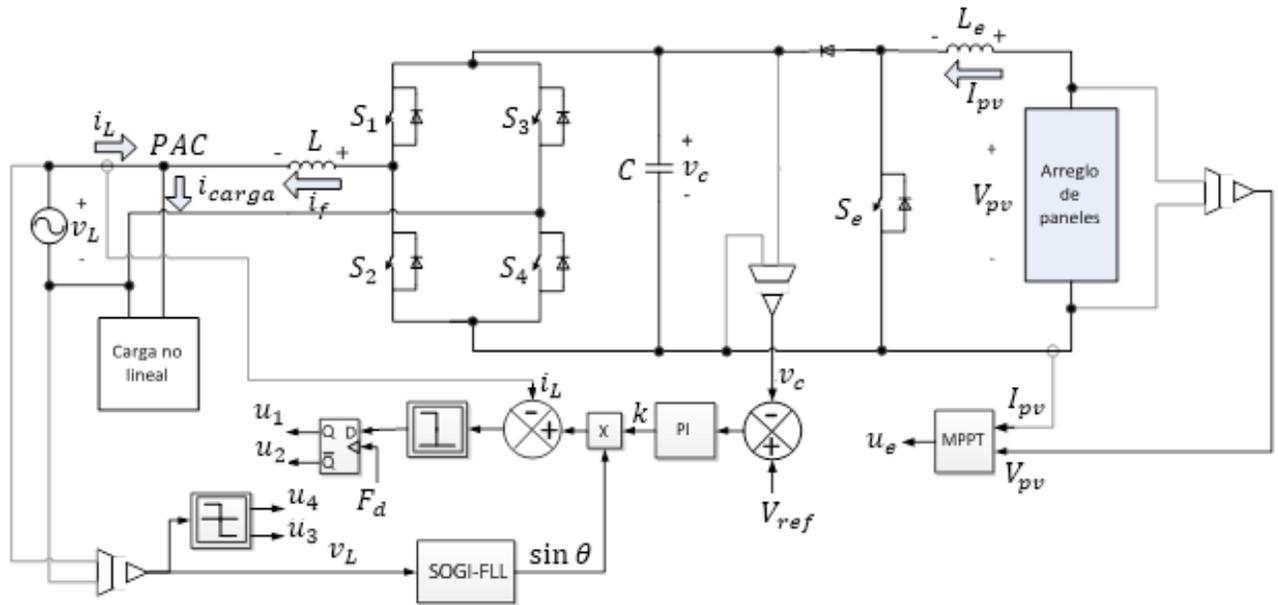


Fig. 1. Diagrama de bloques del inversor con control por modos deslizantes.

El artículo está organizado de la siguiente manera: el sistema propuesto, el modelo y el controlador se discuten en la sección 2, los resultados de la simulación se muestran en la sección 3 y finalmente se dan las conclusiones.

2. Sistema propuesto

La etapa de potencia consiste en un convertidor CD/CD elevador y un convertidor CD/CA conectado a la red (Fig. 1). La función de la primera etapa es extraer el punto de máxima potencia (MPP, por sus siglas en inglés) del panel fotovoltaico, la segunda etapa tiene la función de inyectar a la red la potencia activa generada por éste y además compensar el contenido armónico en el PAC.

A. Algoritmo de seguimiento del punto de máxima potencia (MPPT, por sus siglas en inglés).

Las celdas fotovoltaicas tienen curvas características ($V - I$) que definen el comportamiento de la misma bajo diferentes condiciones de operación (Fig. 2). La potencia de una celda solar está dada por el producto de la corriente (I_{pv}) y la tensión (

V_{pv}). El MPP es el producto de la tensión y la corriente en el punto de máxima potencia para el cual la potencia extraída del panel es máxima (P_{MPP}). El MPP varía continuamente; y depende de factores tales como la temperatura de la celda solar y las condiciones de irradiación [10].

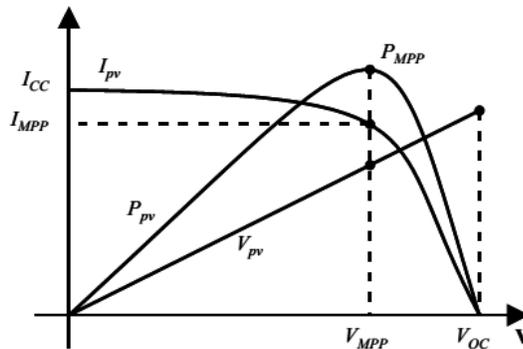


Fig. 2. Curvas de voltaje, corriente y potencia de un panel PV.

La función del algoritmo MPPT es controlar el punto en el cual el panel solar estará trabajando. Hay una gran cantidad de algoritmos MPPT que varían en el número y tipo de entradas, así como la velocidad de respuesta y la eficiencia. Los más comunes son Perturbar y Observar (P&O) [11] y de conductancia incremental (InC) [11-12]; pero también hay basados en lógica difusa [13], modos deslizantes [14], entre otros.

En este trabajo se utiliza el algoritmo P&O que utiliza dos variables de entrada, el voltaje (V_{pv}) y la corriente del panel (I_{pv}); este algoritmo es el más utilizado debido a su sencillez, aunque sin duda no es el mejor [11]. El algoritmo utilizado aumenta o disminuye constantemente el ciclo de trabajo (D) del convertidor CD/CD elevador dependiendo de la comparación de la potencia actual ($P(t)$) con la potencia anterior ($P(t-1)$) (Fig. 3). Si al aumentar el ciclo de trabajo aumenta la potencia de funcionamiento, entonces se mantiene el incremento, de lo contrario el ciclo de trabajo se cambia en la dirección opuesta; lo mismo ocurre si al disminuir el ciclo de trabajo aumenta la potencia de funcionamiento, entonces se mantiene la disminución del ciclo de trabajo. Los incrementos o decrementos son del 3 %.

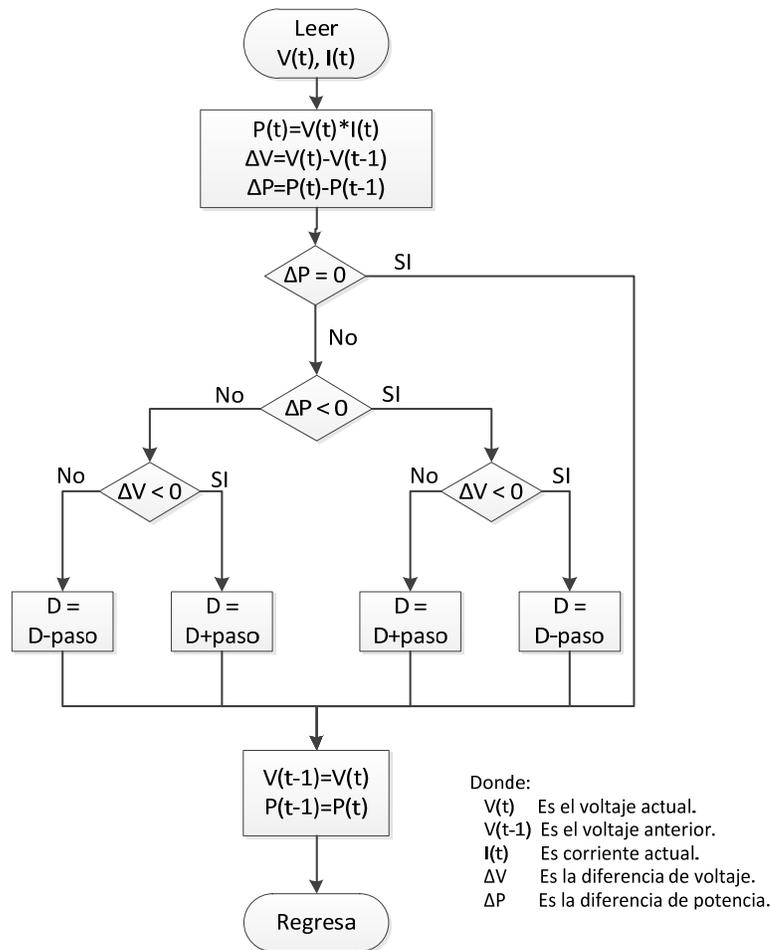


Fig. 3. Diagrama de flujo del algoritmo P&O.

B. La etapa inversora y el modelado.

El circuito simplificado del convertidor CD/CA se muestra en la Fig. 4. Teniendo en cuenta que los cambios en la energía proporcionada por el panel son más lentos que el período de un ciclo de línea de la red eléctrica, el panel fotovoltaico y el convertidor CD/CD elevador serán considerados como una fuente de corriente constante.

El convertidor CD/CA se hace funcionar para producir una tensión de salida unipolar conmutando cada una de las ramas del inversor de manera diferente, S_3 y S_4 se activan cada medio periodo de la red de CA mientras que S_1 y S_2 se usan para controlar la dirección de la corriente inyectada a la red.

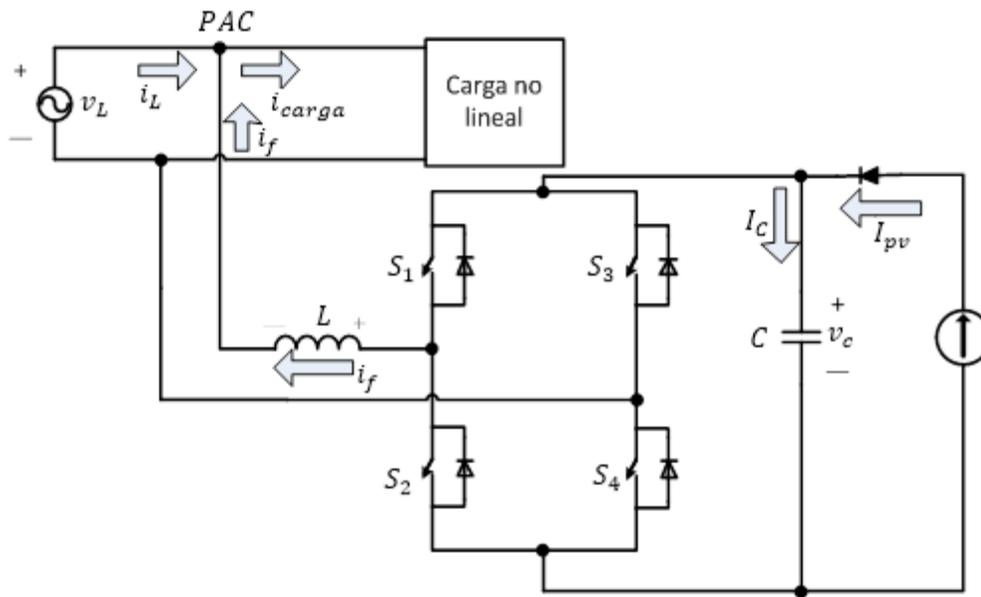


Fig. 4. Circuito simplificado del inversor PV.

El modelo del sistema es:

$$\begin{aligned} \frac{di_f}{dt} &= \frac{v_c}{L}(u_1 - u_3) - \frac{v_L}{L} \\ \frac{dv_c}{dt} &= -\frac{i_f}{C}(u_1 - u_3) + \frac{I_{pv}}{C} \end{aligned} \quad (1)$$

Donde: i_f Es la corriente del inductor.

v_c Es la tensión del capacitor.

I_{pv} Representa la energía proporcionada por el panel fotovoltaico.

u_x Es la señal de control del interruptor S_x con $x = 1, 2, 3$ y 4 .

v_L Es la tensión de red.

Los interruptores de la misma rama son complementarios, por lo tanto:

$$\begin{aligned} u_1 + u_2 &= 1 \\ u_3 + u_4 &= 1 \end{aligned} \quad (2)$$

C. Control por modos deslizantes

El control por modos deslizantes ofrece buenas ventajas como estabilidad a grandes variaciones de carga y voltaje, robustez, buena respuesta dinámica y fácil implementación [15]. Los convertidores electrónicos de potencia son candidatos naturales para el control por modos deslizantes, debido a que tienen estructura variable por el estado de los interruptores y este control se basa en la teoría de las estructuras variable [15-16].

El controlador comienza con la definición de una superficie de deslizamiento y el sistema debe ser atraído y mantenido en ella. La superficie de deslizamiento puede ser una línea, un plano o un hiperplano en función del número de variables del sistema. La existencia del modo deslizante debe ser verificada para asegurar su funcionamiento [15].

Para esta aplicación, la corriente de la red eléctrica principal (i_L) debe ser sinusoidal y en fase con la tensión de la fuente (v_L), incluso con cargas no lineales. Entonces la corriente de la línea debe ser:

$$i_L = k v_L \quad (3)$$

Donde k determina la potencia real demandada por la carga más la energía disponible en el panel PV.

La superficie de deslizamiento (σ) propuesta es:

$$\sigma = i_L - k v_L \quad (4)$$

Se consideran las siguientes leyes de control para los interruptores:

$$u_1 = \begin{cases} 1 & \text{para } \sigma > 0 \\ 0 & \text{para } \sigma < 0 \end{cases} \quad (5)$$
$$u_3 = \begin{cases} 1 & \text{para } v_L < 0 \\ 0 & \text{para } v_L > 0 \end{cases}$$

D. Existencia del modo deslizante

Satisfaciendo la condición de existencia se asegura que el sistema mantendrá la operación. Cabe destacar que aunque esta condición no se cumpliera no significa que el sistema no va a permanecer en la superficie, sólo que es indeterminado. La condición de existencia se puede encontrar satisfaciendo la siguiente desigualdad [15]:

$$\sigma\sigma' < 0 \quad (6)$$

Derivando (4) se obtiene:

$$\sigma' = i'_L - k v'_L \quad (7)$$

Teniendo en cuenta la figura 2 y aplicando la ley de Kirchhoff en el PAC se obtiene:

$$i_L = i_{c\ arg a} - i_f \quad (8)$$

Derivado (8) y sustituyendo en (7) junto con (1), se puede obtener:

$$\sigma' = i'_{c\ arg a} - \frac{v_c}{L} (u_1 - u_3) + \frac{v_L}{L} - k v'_L \quad (9)$$

Considerando que $v_L = V_p \sin(\omega t)$, donde V_p es el voltaje pico de la red, y usando (5) y (6) se obtienen las condiciones de existencia de la superficie deslizante propuesta de la siguiente manera:

- Si σ y v_L son positivos, entonces $u_1 = 1$ y $u_3 = 0$:

$$-\frac{v_c}{L} + \frac{V_p \sin(\omega t)}{L} - k\omega V_p \cos(\omega t) < -i'_{c\ arg a} \quad (10)$$

- Si σ y v_L son negativos, entonces $u_1 = 0$ y $u_3 = 1$:

$$\frac{v_c}{L} + \frac{V_p \sin(\omega t)}{L} - k\omega V_p \cos(\omega t) > -i'_{c\ arg a} \quad (11)$$

- Si $\sigma < 0$ y $v_L > 0$, entonces $u_1 = 0$ y $u_3 = 0$:

$$\frac{V_p \sin(\omega t)}{L} - k\omega V_p \cos(\omega t) > -i'_{c\ arg a} \quad (12)$$

- Si $\sigma > 0$ y $v_c < 0$, entonces $u_1 = 1$ y $u_3 = 1$:

$$\frac{V_p \sin(\omega t)}{L} - k\omega V_p \cos(\omega t) < -i'_{carga} \quad (13)$$

Para satisfacer (10) y (11) la tensión del capacitor (v_c) debe seleccionarse mucho más alta que el valor pico de la red de CA (V_p). Y para satisfacer (12) y (13) la carga debe ser continua y suave para satisfacer las desigualdades.

3. Resultados de simulación

El sistema que se muestra en la Fig. 1 se simuló usando el software PSIM que incluye modelos de paneles fotovoltaicos, por lo que el sistema fue simulado de una manera satisfactoria.

La Tabla I muestra los parámetros considerados en la simulación. El valor de k se determina de manera dinámica por medio de un controlador PI, como en [17-18], sintonizado para una respuesta lenta y para evitar cambios rápidos durante un período de la red eléctrica, y asegurando así un alto factor de potencia. El SOGI-FLL [19] se utiliza para sincronizar la inyección con la red, este método es rápido y capaz de generar una buena referencia incluso con la presencia de armónicos de voltaje.

Arreglo fotovoltaico	
Potencia máxima	240 w
Voltaje circuito abierto	92 V
Corriente cortocircuito	4.76 A
Voltaje nominal (MPP)	67 V
Corriente nominal (MPP)	3.6 A
Topología	
Inductor del elevador (L_e)	0.95 mH
Tensión en el bus de CD	250 V
Capacitor en el bus de CD (C)	330 uF
Inductor de acoplamiento del inversor (L)	5.9 mH
Frecuencia de conmutación del elevador	39 kHz
Reloj del flip-flop (F_d)	120 kHz
Controlador PI	
Ganancia	0.05
Constante de tiempo	0.05
Carga no lineal	
Factor de potencia	68%
Potencia aparente	105 VA
Red	
Frecuencia	60 Hz
Amplitud	120 V rms

Tabla 1. Parámetros de simulación.

La carga no lineal considerada es un rectificador de puente completo alimentando un filtro capacitivo tradicional, con una resistencia de 600Ω , capacitancia de $50 \mu\text{F}$ y se agregó una inductancia de 10 mH . La figura 5 muestra el contenido armónico de la corriente de la carga; se puede observar que el tercer armónico es casi del mismo tamaño que la componente fundamental.

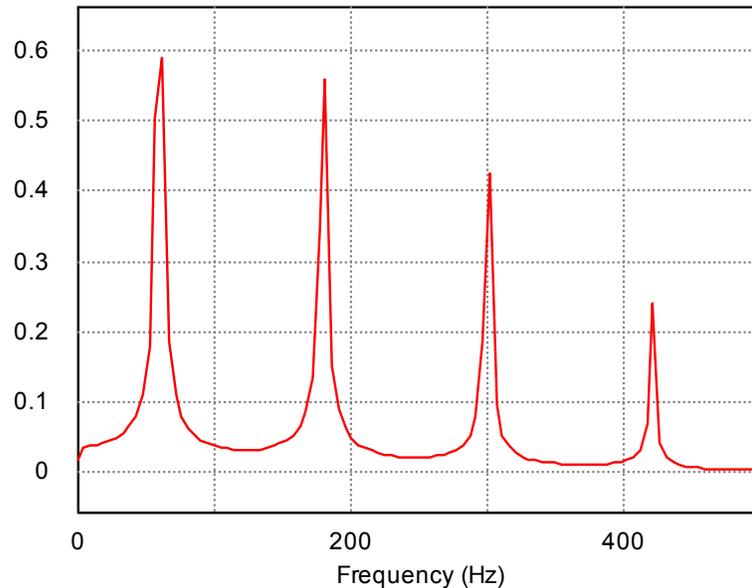


Fig. 5. Contenido armónico de la carga.

El funcionamiento en estado estacionario del sistema propuesto se ilustra en la Fig. 6, en esta prueba la carga exige un alto contenido de armónicos pero también el panel PV proporciona energía suficiente para alimentarla. En la parte superior de la figura se muestra la corriente demandada por la carga no lineal (THD = 107.39%); en el centro la corriente de la red (THD = 7.43%), en este caso el panel proporciona más potencia que la absorbida por la carga por lo cual la energía restante se inyecta a la red, además esta corriente está desfasada 180 grados de la corriente de la carga. En la parte inferior de la figura se muestra la corriente del inversor, donde se puede observar que éste está inyectando potencia activa y componentes armónicas. El factor de potencia en el PAC es 0.99.

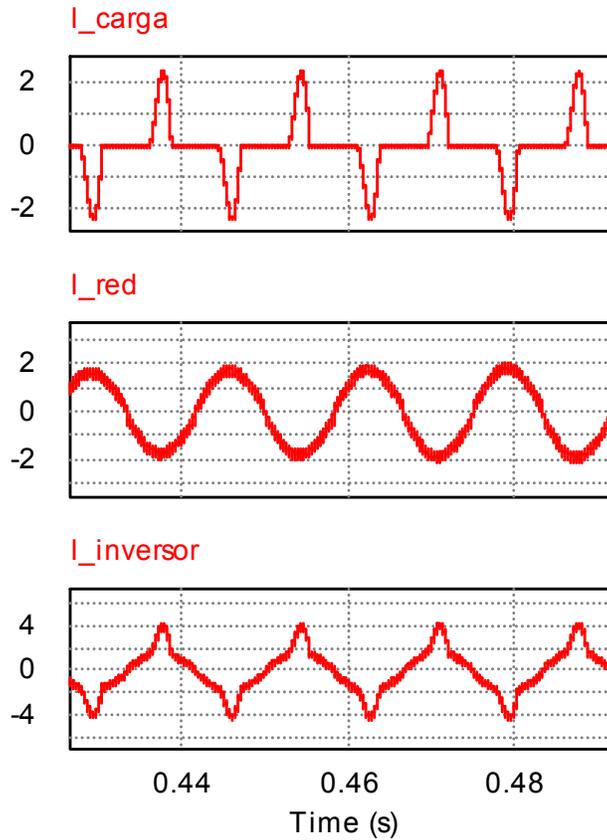


Fig. 6. Corrientes en el PAC. De arriba hacia abajo: corriente de la carga (1 A/div); corriente de la red (1 A/div); corriente del inversor (2 A/div).

El funcionamiento del sistema sin carga se muestra en la Fig. 7. En este caso el convertidor funciona como un sistema fotovoltaico tradicional conectado a la red por lo cual sólo se inyecta potencia activa en la misma. La corriente es desfasada 180 grados respecto al voltaje de la red.

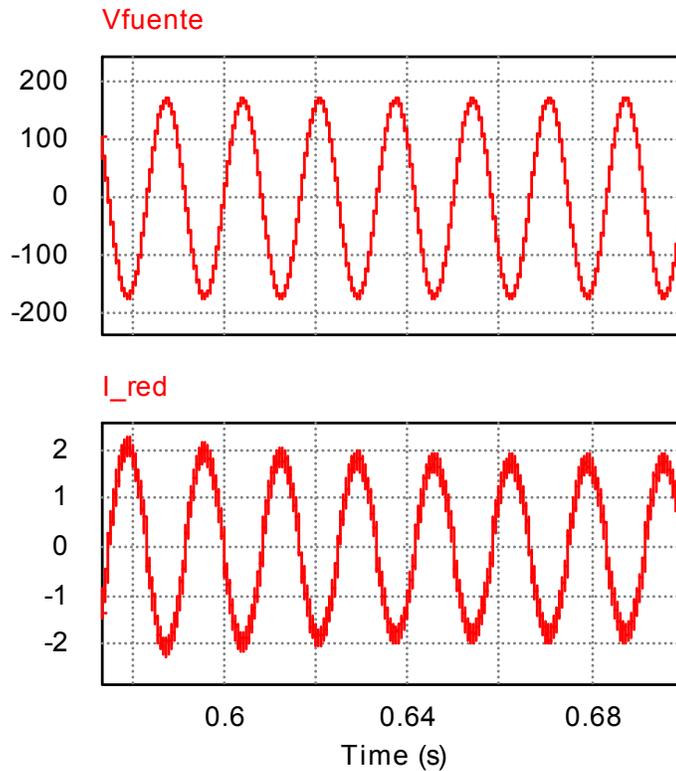


Fig. 7. Topología inyectando sólo potencia activa. De arriba hacia abajo: Voltaje de la red (100 V/div); corriente de la red (1 A/div).

Además, el sistema propuesto tiene la ventaja de funcionar como un filtro activo convencional y esto se ilustra de manera efectiva cuando la alimentación del panel PV es nula (Fig. 8). En la parte superior de la figura se observa la corriente de la carga, en el centro la corriente de red que está en fase con la tensión de red y en la parte inferior la corriente de compensación del inversor.

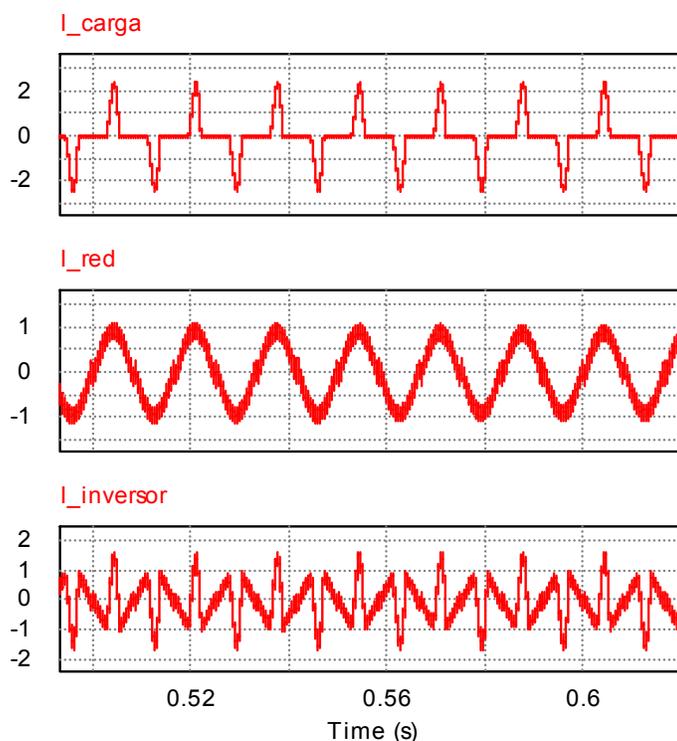


Fig. 8. Función de filtro activo. De superior a inferior: Corriente de la carga (1 A/div); corriente de la red (0.5 A/div); corriente del inversor (1 A/div).

La figura 9 muestra el rendimiento del sistema bajo una variación de alimentación en el panel PV y cómo el sistema es capaz de seguir el MPP. La corriente del panel PV se cambia de 4 A a 3 A, esto ocurre en el momento 0.5 s. Se puede observar también que el sistema es capaz de mantener una corriente sinusoidal en la red, incluso cuando ésta está alimentando cargas no lineales.

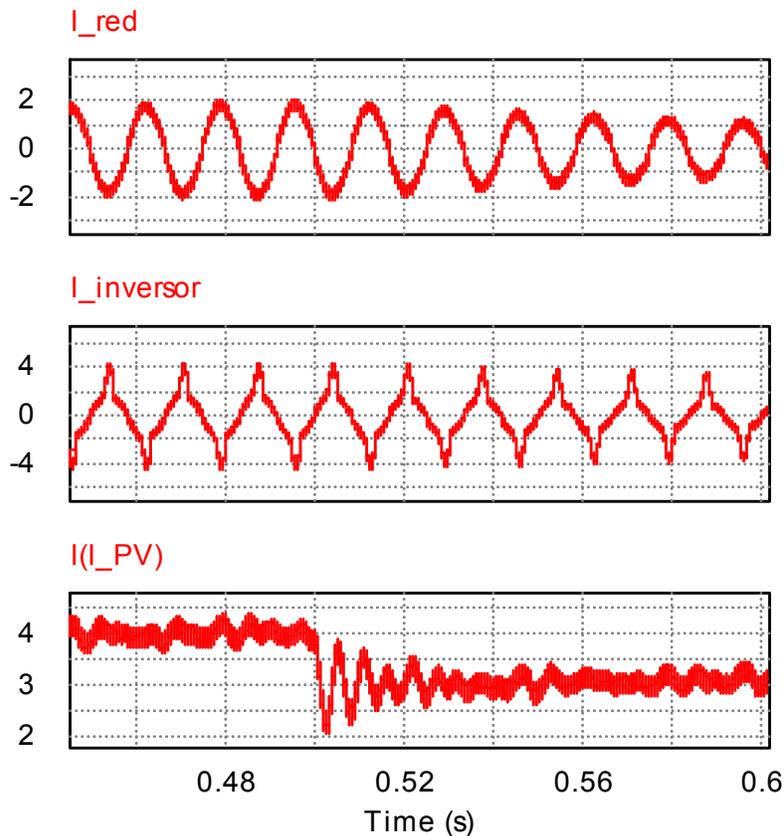


Fig. 9. Cambios de irradiancia solar. De arriba hacia abajo: corriente de la red (1 A/div); corriente del inversor (2 A/div); corriente del panel (0.5 A/div).

4. Conclusiones

En este trabajo se propuso un controlador por modos deslizantes para un sistema de paneles PV, conectado a la red eléctrica, con multifunción. El sistema estudiado tiene dos etapas: un convertidor elevador CD/CD, un inversor de puente completo y es capaz de inyectar tanto la potencia activa (desde el panel PV) como la reactiva para compensar los armónicos de las cargas no lineales conectadas a la red.

Se presentó el funcionamiento del sistema así como los resultados de simulación que confirman la viabilidad de la propuesta. El sistema no fue sólo probado con cargas no lineales, sino también bajo variaciones de potencia del panel PV. En todos los casos, el factor de potencia es de 0,99. Otra de sus principales ventajas es que durante las noches, cuando la potencia del panel es nula, el sistema es capaz de eliminar los

armónicos de corriente y elevar el factor de potencia en el PAC drenando energía de la red.

5. Referencias

- [1] Renewable Energy Policy Network for the 21st Century. "Global status Report 2014". De: <http://www.ren21.net/ren21activities/globalstatusreport.aspx>. Consultado en Marzo del 2015.
- [2] V. E. Wagner, Balda et al., "Effects of Harmonics on Equipment". IEEE Transactions on Power Delivery. 1993. 672-679 pp.
- [3] N. R. Raju, S. S. Venkata, R. A. Kagalwala, V.V. Sastry, "An active power quality conditioner for reactive power and harmonics compensation". Power Electronics Specialists Conference. Vol. 1. Jun. 1995. 209-214 pp.
- [4] A. M. Massoud, S. J. Finney, B. W. Williams, "Seven-level shunt active power filter". Harmonics and Quality of Power. 11th International Conference. 2004. 136-141 pp.
- [5] S. Inoue, T. Shimizu, K. Wada, "Control Methods and Compensation Characteristics of a Series Active Filter for a Neutral Conductor". Industrial Electronics, IEEE. Vol. 54. No. 1. Feb. 2007. 433-440 pp.
- [6] H. Wada, F. Blaabjerg, Xiongfei Wang, "Active Harmonic Filtering Using Current-Controlled, Grid-Connected DG Units With Closed-Loop Power Control". Power Electronics, IEEE. Vol. 29. No. 2. Feb. 2014. 642-653 pp.
- [7] P. C. Tan, Z. Salam, A. Jusoh, "A Single-Phase Hybrid Active Power Filter using Extension p-q Theorem for Photovoltaic Application". Power Electronics and Drives Systems, International Conference. Vol. 2. 2005. 1250-255 pp.
- [8] P. Neves, D. Goncalves, J. G. Pinto, R. Alves, J. L. Afonso, "Single-phase Shunt Active Filter interfacing renewable energy sources with the power grid". Industrial Electronics. 35th Annual Conference of IEEE. Nov. 2009. 3264-3269 pp.

- [9] S. A. O. da Silva, L. P. Sampaio, L. B. G. Campanhol, "Single-phase grid-tied photovoltaic system with boost converter and active filtering". *Industrial Electronics (ISIE), IEEE 23rd International Symposium*. Jun. 2014. 2502-2507 pp.
- [10] M. C. Di Piazza, G. Vitale. *Photovoltaic Sources Modeling and Emulation*. 2013. Ed. Springer. 56-67 pp.
- [11] S. K. Dash, D. Verma, S. Nema, R. K. Nema, "Comparative analysis of maximum power point (MPP) tracking techniques for solar PV application using MATLAB simulink". *Recent Advances and Innovations in Engineering (ICRAIE)*. May 2014. 7-11 pp.
- [12] A. Morales, J. L. Diaz-Bernabe, R. Garrido-Moctezuma, "Improved MPPT adaptive incremental conductance algorithm". *Industrial Electronics Society, IECON 2014 - 40th Annual Conference of the IEEE*. Nov. 2014. 5540-5545 pp.
- [13] R. B. Roy, E. Basher, R. Yasmin, M. Rokonzaman, "Fuzzy logic based MPPT approach in a grid connected photovoltaic system". *Software, Knowledge, Information Management and Applications (SKIMA), 8th International Conference on*. Dec. 2014. 1-6 pp.
- [14] N. Vázquez, Y. Azaf, I. Cervantes, E. Vázquez, C. Hernández, "Maximum Power Point Tracking Based on Sliding Mode Control". *International Journal of Photoenergy*, Article ID 380684, in press.
- [15] A. Agrachev, et al., *Nonlinear and Optical Control Theory*. 2004. Ed. Springer. 289-316 pp.
- [16] S. Tan, Y. Lai, Chi-Kong Tse, *Sliding Mode Control of Switching Power Converters: Techniques and Implementation*. 2012. Ed. Taylor and Francis group. 1-17 pp.
- [17] D. A. Torrey, A. M. A. M. Al-Zamel, "Single-phase active power filters for multiple nonlinear loads". *Power Electronics, IEEE*. Vol. 10. No. 3. May 1995. 263-272 pp.

- [18] J. Matas, L. G. de Vicuna, J. Miret, J. M. Guerrero, M. Castilla, "Feedback Linearization of a Single-Phase Active Power Filter via Sliding Mode Control". *Power Electronics*, IEEE. Vol.23. No.1. Jan. 2008. 116-125 pp.
- [19] R. Villalobos Mendoza, "Diseño e implementación de un circuito digital de amarre de fase, para sincronía en aplicaciones de interconexión con la red eléctrica" Tesis de Maestría. Instituto Tecnológico de Celaya. Gto, México. 2013.

6. Autores

Ing. Iván Méndez Soriano es Ingeniero en Automatización por el Instituto Tecnológico de Tehuacán en 2012 y actualmente es estudiante de Maestría en Ciencias en Ingeniería Electrónica en el Instituto Tecnológico de Celaya.

Dr. Nimrod Vázquez Nava obtuvo el título de Ingeniero en Electrónica por el Instituto Tecnológico de Celaya en 1994, los grados de Maestro en Ciencias en Ingeniería Electrónica y Doctor en Ciencias en Ingeniería Electrónica por el CENIDET en 1997 y 2003 respectivamente, actualmente es profesor-investigador en el Instituto Tecnológico de Celaya e investigador nivel 1 en el SNI.

M. C. Héctor Juan Carlos López Tapia obtuvo el título de Ingeniero Electrónico y el grado de Maestro en Ciencias en Ingeniería Electrónica por el Instituto Tecnológico de Celaya, actualmente es docente en el Instituto Tecnológico de Celaya.

M.C. Claudia V Hernández Gutiérrez obtuvo el título de Ingeniero en Electrónica por el Instituto Tecnológico de Celaya en 1995 y el grado de Maestra en Ciencias en Ingeniería Electrónica por el CENIDET en 2000, actualmente es docente del Posgrado en Electrónica en el Instituto Tecnológico de Celaya.