

Método de Control de Aumento Simple de Ganancia de un Microinversor Z-source Monofásico con la Técnica SPWM Modificada

R.O. Quiñones-Sotelo

J.L. Durán-Gómez

Tecnológico Nacional de México / Instituto Tecnológico de Chihuahua
División de Estudios de Posgrado e Investigación
Ave. Tecnológico #2909, Col. 10 de mayo
Chihuahua, Chih. C.P.31310
Tel. +52 (614) 201-2000 Exts. 2112 y 2114

roquinones@itchihuahua.edu.mx

jlduran@itchihuahua.edu.mx

RESUMEN

En este trabajo se presenta el diseño de un microinversor Z-source monofásico, el cual se caracteriza por operar con estados de shoot-through, otorgándole la característica de ser un inversor buck-boost. Para el diseño de la red de impedancia se muestran las fórmulas para obtener los valores de los inductores y el capacitor. También se resume la técnica de conmutación SPWM modificada que se implementó, la cual consiste en la técnica SPWM tradicional agregándole las señales de conmutación para generar los estados de shoot-through. En la simulación se obtuvieron valores similares a los que se calcularon, mientras que en la experimentación se observó que debido a los elementos parásitos de la red de impedancia y la ganancia que se le demande al circuito afecta en la eficiencia del microinversor. En la implementación se utilizó el kit de evaluación eZdsp F28335 de Texas Instruments para generar los patrones de pulsos para la conmutación del microinversor.

ABSTRACT

This paper presents the design of a single-phase Z-source microinverter, which is characterized by operate with shoot-through states, giving the characteristic of being a buck-boost inverter. For the design of the impedance network, the formulas to obtain the values of the inductors and the capacitor are shown. It also summarizes the modified SPWM switching technique that was implemented, which consists of the traditional SPWM technique plus switching to generate the shoot-through states. In the simulation, values like those that were calculated were obtained, while in the experimentation it was observed that due to the parasitic elements of the impedance network and the gain demanded from the circuit affects the efficiency of the microinverter. In the implementation, the eZdsp F28335 evaluation kit from Texas Instruments was used to generate the pulse patterns for the microinverter commutation.

1. INTRODUCCIÓN

En los últimos años, ha aumentado la tendencia de utilizar la energía producida por fuentes renovables como por ejemplo la energía solar, eólica, hidráulica, mareomotriz, entre otras, para

producir energía eléctrica. Esto con el fin de buscar alternativas que contaminen menos que los combustibles fósiles.

La energía fotovoltaica es una de las fuentes renovables más populares, y consiste en la transformación de la radiación solar en electricidad, esto es en corriente directa (cd). Como la energía solar es gratuita, el costo total para la generación de energía consistiría en los módulos solares, convertidores, el sistema de acondicionamiento de energía, instalación y mano de obra.

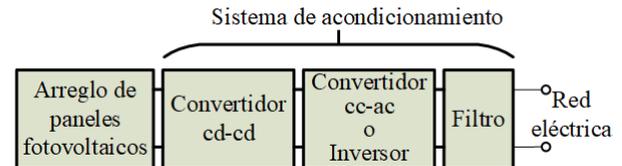


Fig. 1 Diagrama a bloques de un sistema fotovoltaico conectado a la red eléctrica.

Hoy por hoy, el número de sistemas fotovoltaicos conectados a la red eléctrica ha crecido. El objetivo de estas instalaciones es cubrir total o parcialmente las necesidades de consumo, aprovechando los espacios que tenga disponible para colocar el sistema fotovoltaico y reducir la provisión eléctrica exterior, cuando existe un déficit entre la demanda de electricidad respecto a la energía generada por el sistema fotovoltaico, este diferencia la proporciona la red eléctrica, en caso contrario, cuando se tenga un excedente entre la demanda respecto a la energía eléctrica producida, esta energía es inyectada a la línea de distribución del proveedor del servicio eléctrico [1].

Este documento se concentra principalmente en la etapa de acondicionamiento de un sistema fotovoltaico, el cual está conformado por un convertidor de cd-ca (inversor), los inversores se encargan de transformar un voltaje en corriente directa a un voltaje en corriente alterna, el objetivo es producir una salida sinusoidal cuya magnitud y frecuencia se puedan controlar [2], generalmente, las instalaciones fotovoltaicas utilizan un inversor central al que se le conectan múltiples módulos solares conectados en serie, paralelo o una

combinación de ambas, para convertir el voltaje en corriente directa de los paneles a voltaje en corriente alterna (ca) en la salida del inversor, como se representa en la Fig. 2. Esta configuración tiene la ventaja de ser más económico que otras configuraciones, pero tiene la desventaja que en caso de el inversor sufra alguna falla, toda la energía producida por los paneles fotovoltaicos se perderá hasta que el inversor sea reparado o sustituido. Además, esta configuración puede tener un impacto negativo en la eficiencia del sistema debido a que al inversor le resulta imposible operar en la máxima eficiencia de cada panel fotovoltaicos, ya que cada panel tiene su propio punto de máxima eficiencia. La eficiencia del sistema puede llegar a mejorar al utilizar un inversor para cada panel solar en lugar de un solo inversor para todo el sistema, a esta configuración se le conoce como microinversor (Fig. 3). El principal beneficio de esta configuración es que a pesar de que un microinversor no funcione correctamente, se continúa generando energía [3], otro beneficio es que permite a cada panel fotovoltaico operar a una eficiencia de conversión óptima, mejorando también la eficiencia del sistema, [4].

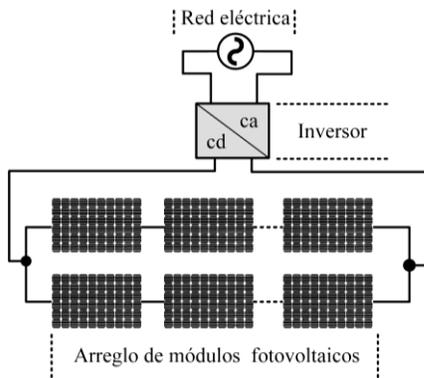


Fig. 2 Diagrama esquemático de la configuración típica para un arreglo de paneles fotovoltaicos con inversor central.

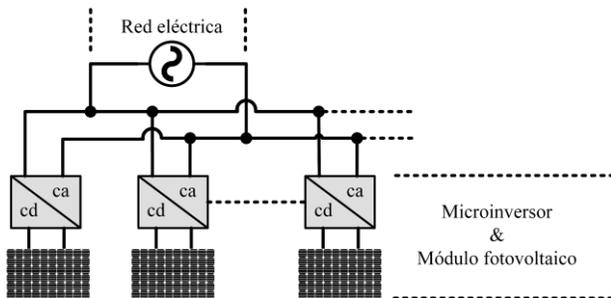


Fig. 3 Diagrama esquemático de la configuración típica para un arreglo de paneles fotovoltaicos con microinversor.

En la referencia [5] se presenta una topología de un inversor que supera las barreras y limitaciones de los inversores tradicionales. El inversor Z-source tiene un comportamiento como inversor elevador – reductor (Buck-boost), este inversor tiene la característica principal de tener un amplio rango de voltaje de salida, esto gracias a su arreglo de impedancias

conformado por dos inductores y dos capacitores [5]. Utilizar un inversor Z-source reduciría la cantidad de elementos para un sistema fotovoltaico ya que no requiere de una etapa adicional para elevar el voltaje.

Este documento propone el diseño y el control de un microinversor Z-source utilizando la técnica de control de aumento de ganancia simple para obtener los índices de modulación M_a y el ciclo de trabajo del Shoot-through con la intención de elevar el voltaje cd de la entrada del inversor y así obtener un voltaje ca de salida de mayor magnitud.

2. ESTRUCTURA DE UN MICROINVERSOR Z-SOURCE

En esta sección se presenta los elementos para el diseño y operación del microinversor Z-source.

Fang Zheng Peng propone una nueva topología de un convertidor de fuente de impedancia que supera las limitaciones de los convertidores tradicionales de fuente de voltaje y fuente de corriente, y el método de control para la implementación de un convertidor cd-ca utilizando el convertidor propuesto.

La red de impedancia se puede considerar como una red de dos puertos que consiste en dos capacitores conectados en forma cruzada y dos inductores conectados como se puede observar en la Fig. 4.

Una de las características principales del inversor Z-source es que tiene un comportamiento como un inversor Buck-Boost, mientras que un inversor de fuente de voltaje es un inversor buck (reductor) debido a que el voltaje ca de salida no puede ser más grande que el voltaje cd de entrada, en caso que se requiera un voltaje más grande se tendría que agregar un convertidor cd-cd adicional para obtener el voltaje ca de salida deseado, esta etapa adicional incrementaría el costo y reduce la eficiencia del sistema. Por otro lado activar los dos interruptores de una misma rama inversor provocaría un cortocircuito, el cual podría llegar a destruir al dispositivo, a esta operación se le llama shoot-through y está prohibido en los inversores de fuente de voltaje, para evitar este problema se le agrega un tiempo muerto a la señal de conmutación para evitar que los interruptores de una misma rama se activen al mismo tiempo, este tiempo muerto genera una distorsión adicional que se refleja en la forma de onda de la salida. [5].

El inversor Z-source hace posible operar con el estado shoot-through, por medio de este estado el inversor es capaz de elevar el voltaje y le otorga la característica de un inversor buck-boost al inversor Z-source.

La red de impedancia Z-source es una combinación de dos inductores y dos capacitores conectadas como se muestra en la Fig. 4. Este circuito combinado permite ser el elemento de almacenamiento y filtrado de energía para el inversor de fuente Z. La red de impedancia provee un filtro de segundo orden y es más efectivo suprimiendo rizados de voltaje y corriente que usar capacitores o inductores individualmente en los inversores tradicionales [5].

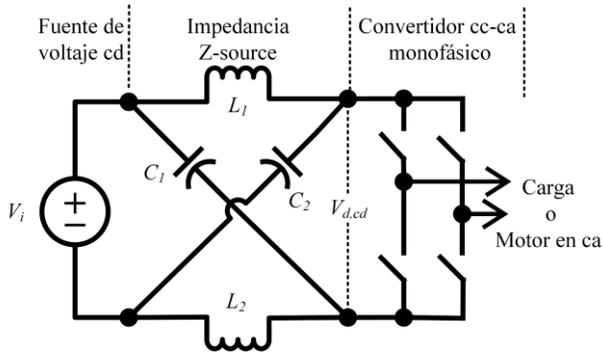


Fig. 4 Inversor Z-source monofásico.

Para obtener los valores de los inductores y capacitores de la red de impedancia, S. Rajakaruna [6] publica un análisis en estado estable de cada una de las etapas que atraviesa el inversor Z-source a lo largo de la conmutación con el objetivo de obtener una guía de diseño, el análisis y desarrollo, de la cual se obtuvo (1) para el valor de capacitor, C y (2) para el valor del inductor, L.

$$C = C_1 = C_2 = \frac{d_s \cdot T_s \cdot M_a \cdot I_{max} \cdot \cos\theta}{4 \cdot k_v \cdot V_{i,cd} \cdot (1-d_s)} \quad (1)$$

$$L = L_1 = L_2 = \frac{V_{i,cd} \cdot d_s \cdot T_s \cdot (1-d_s)}{k_i \cdot M_a \cdot I_{max} \cdot \cos\theta} \quad (2)$$

donde el índice de shoot-through, d_s controla el tiempo en el que los interruptores de una misma rama estarán activados, el índice de modulación, M_a es índice de modulación de la técnica SPWM tradicional, para el control del rizo de la corriente del inductor y del voltaje del capacitor se tienen los parámetros k_v y k_i respectivamente, entre los demás parámetros que utiliza la ecuación están la corriente pico de la salida del inversor, I_m , el factor de potencia, $\cos\theta$ y el voltaje en cd de la entrada, $V_{i,cd}$.

La relación entre el índice de modulación y shoot-through dependerá de la estrategia de control que adopten los interruptores del convertidor de cd-ca.

3. CONMUTACIÓN DE UN INVERSOR Z-SOURCE

En un microinversor Z-source monofásico, la ganancia de voltaje se expresa como:

$$V_{ac,pico} = V_{i,dc} \cdot M_a \cdot B \quad (3)$$

donde $V_{ac,pico}$ se obtiene al multiplicar el voltaje cd de la entrada por la ganancia de voltaje, $M_a \cdot B$.

B es el factor de aumento (boost factor) el cual es determinado por (4) y (5) y M_a es el índice de modulación del inversor

$$B = \frac{1}{1-2 \cdot d_s} \quad (4)$$

$$d_s = \frac{T_0}{T} \quad (5)$$

donde T_0 es el intervalo de tiempo de shoot-through.

Para este trabajo se utilizó el método de control de aumento simple de ganancia (*simple boost control*), donde el ciclo de trabajo de shoot-through máximo está limitado a $(1 - M_a)$. La línea gruesa de la Fig. 5 muestra la relación de ganancia de voltaje con respecto al índice de modulación, M_a . El área sombreada representa la región de operación disponible utilizando esta estrategia de control, [7].

El convertidor cd-ac conformado por cuatro dispositivos MOSFETs los cuales son controlados por los índices de modulación que provocaran los estados de shoot-through necesarios para elevar el voltaje de enlace cd y los estados non-shoot-through necesarios para producir una señal senoidal en la salida con el nivel de voltaje esperado. En la Fig. 6 se muestra el diagrama del convertidor cd-ca monofásico, donde el voltaje, V_d representa el nivel de voltaje de enlace cd. Para la conmutación del microinversor se utilizó la tarjeta de evaluación eZdsp F28335 de Texas Instruments en la cual se implementó la técnica SPWM modificada para obtener un aumento de voltaje provocando el estado de shoot-through. La técnica SPWM consiste en implementar la técnica SPWM tradicional la cual compara una señal triangular con una señal de referencia senoidal, y agregarle los estados de shoot-through que son generados por la comparación de la señal triangular con una señal constante, dependiendo del nivel de la señal constante se controla el tiempo para provocar los estados de shoot-through. En la Fig. 7 se muestran las señales de conmutación para el disparo de los dispositivos MOSFETs del convertidor cd-ca.

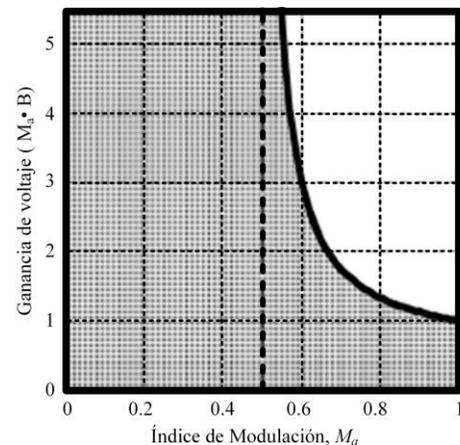


Fig. 5 Relación del índice de modulación vs la ganancia del microinversor Z-source [7].

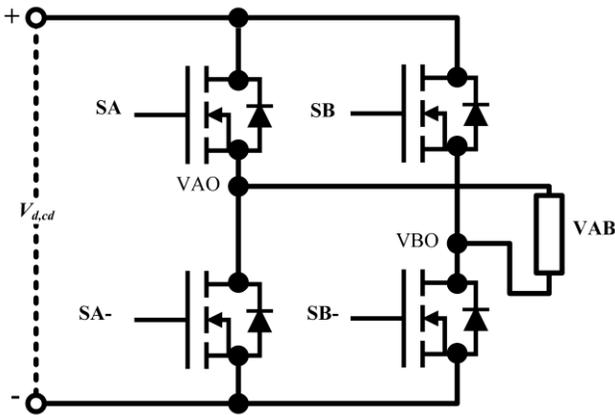


Fig. 6 Diagrama del convertidor cd-ca puente completo.

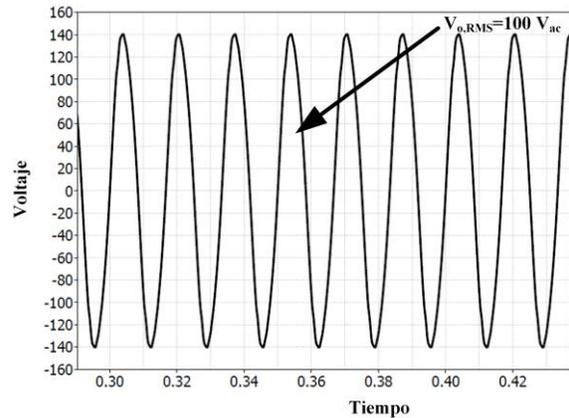


Fig. 8 Variación con respecto al tiempo del voltaje de salida, $v_{o,ca}(\omega t)$, del del microinversor Z-source.

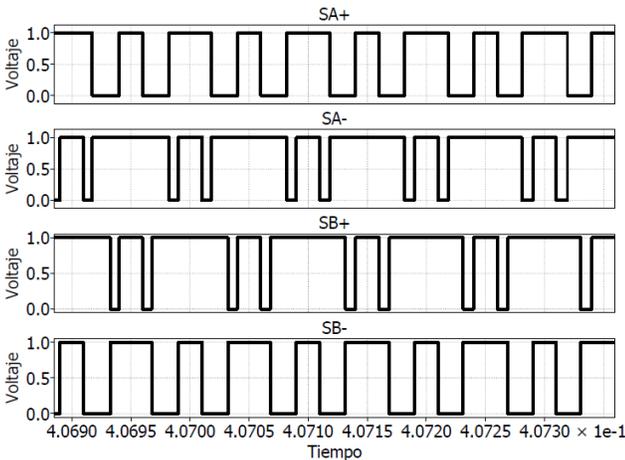


Fig. 7 Señales de conmutación para el microinversor Z-source

4. RESULTADOS DEL PROTOTIPO MICROINVERSOR Z-SOURCE

En esta sección se presenta los resultados de simulación y experimentales del prototipo microinversor Z-source.

4.1. Resultados de Simulación

Para los parámetros de diseño se consideró una fuente de voltaje en cd de 48 V, un voltaje de salida de 100 V_{RMS} , k_v de 0.6% y $k_i=30\%$ y 133 W de potencia.

Con el análisis de [6], el valor de los capacitores e inductores de la red de impedancia son: 100 μ F y 2 mH, de acuerdo con los datos de diseño, se realizó la simulación en el software PLECS® de la compañía PLEXIM. En la Fig. 8 se muestra el voltaje de salida en corriente alterna, $v_{o,ca}(\omega t)$ del inversor a través de una carga resistiva de 75 Ohm, a una frecuencia de 60 Hz.

Con el análisis matemático del inversor Z-source se obtuvo el índice de modulación, M_a igual a 0.6022 y el índice de shoot-through, d_s igual a 0.398, donde el índice de shoot-through se encarga de elevar el voltaje de enlace cd para obtener en la salida del inversor el voltaje deseado en ca. En la Fig. 9 se puede ver el voltaje de enlace cd que alimenta al circuito puente completo del inversor Z-source, donde su voltaje promedio es 143 V en corriente directa.

Es interesante notar que el voltaje promedio en cada uno de los capacitores de la red de impedancia tiene un valor de 143 V, el voltaje promedio del capacitor y el voltaje de enlace cd son el mismo, en la Fig. 10 se puede observar el voltaje del capacitor.

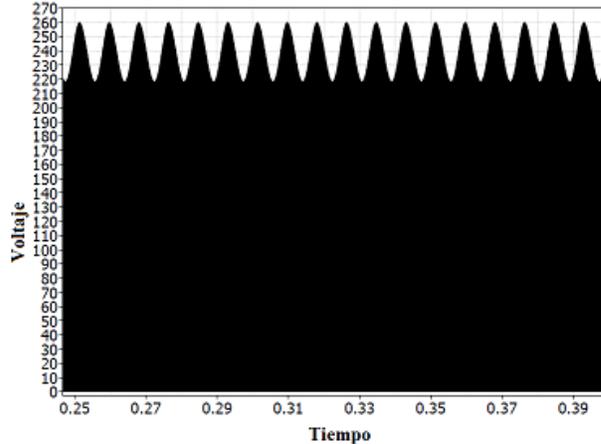


Fig. 9 Variación con respecto al tiempo del voltaje de enlace cd, $v_{d,cd}(\omega t)$, del microinversor Z-source.

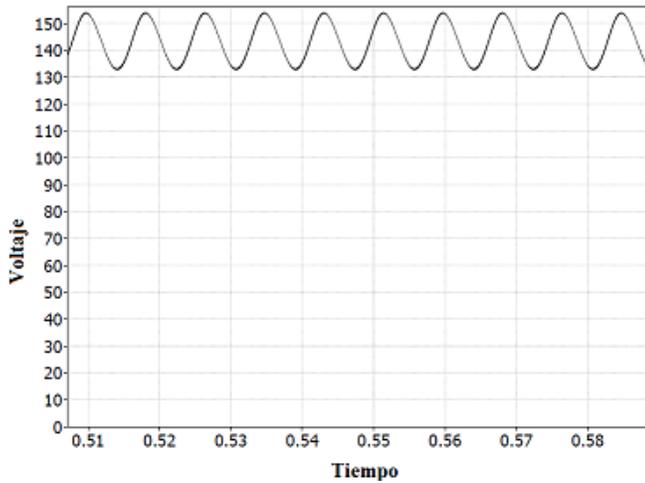


Fig. 10 Variación con respecto al tiempo del voltaje del capacitor, $v_{c1}(\omega t)$.

4.2. Resultados experimentales

Para la experimentación se tomaron en cuenta los mismos parámetros que en la simulación, la única diferencia es que en la simulación se tomaron los valores ideales de los capacitores e inductores de la red impedancia y en la experimentación se tienen los elementos parásitos de estos componentes.

Con los mismos índices de modulación y shoot-through se obtuvo un voltaje de $84.5 \text{ V}_{\text{RMS}}$ a través de la resistencia de 75 ohms y una potencia de salida de 92.25 W , como se puede ver en la Fig. 11, donde $i_o(\omega t)$ es la señal de la corriente a través de la resistencia, $v_o(\omega t)$ es la señal del voltaje de salida y por último se utilizó la función matemática del osciloscopio para determinar la potencia $p_o(\omega t)$ de la salida del microinversor Z-source como también su valor promedio.

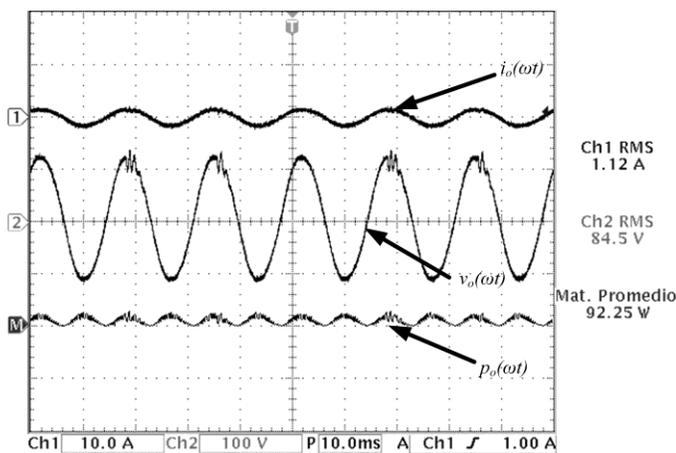


Fig. 11 Variación con respecto al tiempo del voltaje, $v_o(\omega t)$, corriente, $i_o(\omega t)$ y potencia, $p_o(\omega t)$ del microinversor Z-source.

Se observó además que la eficiencia era del 54%, el voltaje de alimentación fue de 48 V en cd y una potencia de entrada de 168 W , después de buscar la razón por la que el microinversor estaba dando esa eficiencia se encontró que cada inductor estaba teniendo 32.89 W de pérdidas como se ve en la Fig. 12 donde se utilizó la función matemática del osciloscopio para observar la potencia instantánea, $p_{L1}(\omega t)$, en cada inductor y obtener la potencia promedio, viendo también la forma de onda del voltaje, $v_{L1}(\omega t)$, y corriente $i_{L1}(\omega t)$ en el inductor, además cabe mencionar la resistencia parásita del inductor es de 0.4 ohm .

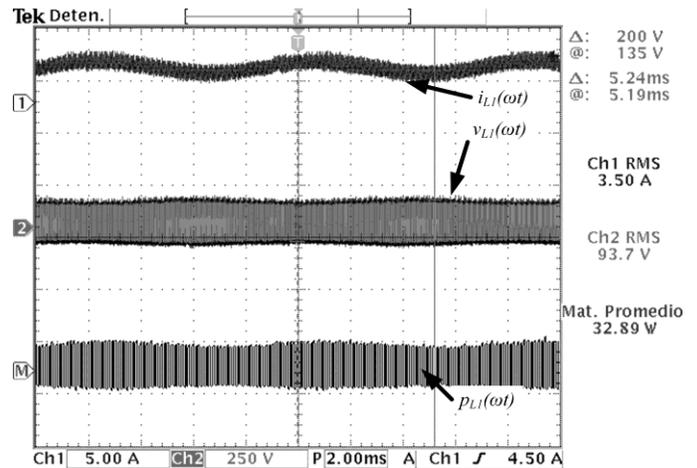


Fig. 12 Variación con respecto al tiempo del voltaje, $v_{L1}(\omega t)$ corriente, $i_{L1}(\omega t)$ y pérdidas, $p_{L1}(\omega t)$ en el inductor de la red de impedancia Z-source.

Se realizaron varias pruebas exigiéndole diferentes ganancias al circuito y la eficiencia disminuía conforme aumentaba la ganancia del circuito, de la misma manera pasaba con las pérdidas en los inductores, conforme aumentaba la ganancia las pérdidas en los inductores aumentaba.

Respecto al voltaje de enlace cd, obtuvo un voltaje promedio de 132 V como se observa en la Fig. 14 y el voltaje promedio del capacitor, V_{c1} fue de 130 V como se aprecia en la Fig. 13, reflejando un voltaje similar que al voltaje de enlace cd. Actualmente se está trabajando en el control del microinversor Z-source, el control consiste en ajustar el voltaje de enlace cd, $V_{d,cd}$ por medio de la medición del voltaje del capacitor ajustando el índice de modulación de shoot-through para obtener el nivel de voltaje $V_{d,cd}$ deseado, en la literatura esta técnica es adoptada por [8], [9] y [10]; en los cuales obtienen la función de transferencia por medio del análisis de variables de espacios de estado.

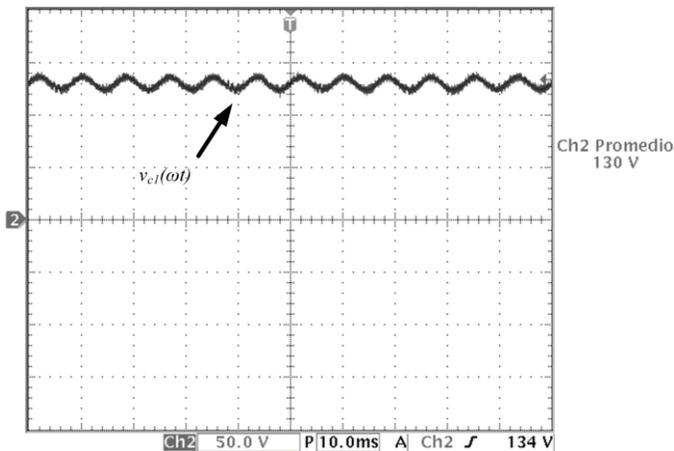


Fig. 13 Variación con respecto al tiempo del voltaje del capacitor, $v_{c1}(\omega t)$ del microinversor Z-source.

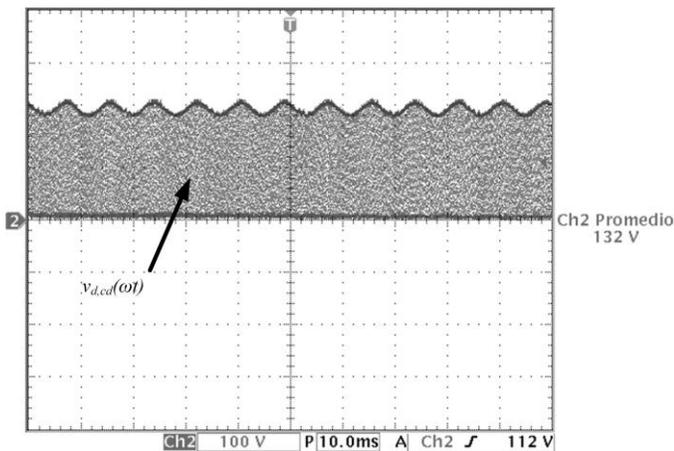


Fig. 14 Variación con respecto al tiempo del voltaje de enlace cd, $v_{d,cd}(\omega t)$.

5. CONCLUSION

En este artículo se ha presentado el diseño, simulación y experimentación de un microinversor Z-source. Se han incluido las fórmulas de diseño red de impedancia Z-source para un microinversor monofásico. Para la operación del microinversor se ha mostrado la técnica de conmutación SPWM tradicional sumándole a esta la comparación de una señal triangular y una señal constante para generar los pulsos de shoot-through y con esto aumentar el voltaje de entrada $V_{i,cd}$ y obtener un voltaje de salida, $V_{o,ac}$ más grande.

Para generar las señales de conmutación se utilizó el software PSIM ya que gracias a su interfaz se tuvieron que conectar bloques para generar el patrón de pulsos necesarios para la operación del microinversor y generar el código en

lenguaje C, esta modulación fue implementada en el kit de evaluación eZdsp F28335.

Para la simulación, se ha elaborado una hoja de cálculos del análisis del microinversor Z-source, donde se introdujeron los parámetros de diseño del inversor para obtener los índices de modulación, M_a y shoot-through, d_s , se utilizó el software PLECS® para verificar y comparar los resultados, donde los resultados del simulador fueron muy aproximados a los obtenidos en la hoja de cálculos. En la simulación y en la experimentación se logró el aumento de voltaje con la técnica de control de aumento simple de ganancia para una entrada de voltaje cd de 48 V exigiéndole un voltaje ca de salida de 100 V_{RMS}, se observó que conforme disminuía el índice de modulación del inversor la ganancia máxima del circuito aumentaba, esto es debido a que el ciclo de trabajo del shoot-through es igual a $1-M_a$, como se muestra en la Fig. 5. Sin embargo, en la experimentación se observó que los elementos parásitos del inductor limitan la ganancia del inversor conforme se va aumentando el índice de shoot-through aumentaban las pérdidas en los inductores de la red Z-source.

6. REFERENCIAS

- [1] R. González-G., H.R. Jiménez-G. y J. Lagunas-M, "Sistemas fotovoltaicos conectados a la red", *Boletín IIE*, vol. 27, n° 4, pp. 140-144, 2003.
- [2] N. Mohan, W. P. Robbin, y T. Undeland, *Electronica de Potencia: Convertidores, aplicaciones y diseño*, New York: McGraw-Hill, 1995.
- [3] Yu Z And Ogboenyira K, "Renewable Energy Through Micro-Inverters," 2009. [Online]. Available: <http://www.powerelectronics.com/discrete-power-semis/renewable-energy-through-micro-inverters>. [Accessed 15 June 2019].
- [4] S. Harb, M. Kedia, H. Zhang y R.S. Balog, "Microinverter and string inverter grid-connected photovoltaic system — a comprehensive study," in *2013 IEEE 39th Photovolt. Specialists Conf. (PVSC)*, Tampa, FL, USA, June 16-21, 2013, pp. 2885 - 2890.
- [5] F. Z. Peng, "Z-source inverter," *IEEE Trans. Ind Appl.*, vol. 39, n° 2, pp. 504 - 510, March 2003.
- [6] S. Rajakaruna y L. Jayawickrama, "Steady-State Analysis and Designing Impedance Network of Z-Source Inverters," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 57, n° 7, pp. 2483 - 2491, Nov. 2010.
- [7] F.Z Peng, M. Shen y Z. Qian, "Maximum boost control of the Z-source inverter," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 20, n° 4, pp. 833 - 838, July 2005.
- [8] "Algorithms for controlling both the dc boost and ac output voltage of z-source inverter," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 54, n° 5, pp. 2745-2750, Oct. 2007.
- [9] X.Ding, Z.Qian, S.Yang, B.Cui and F.Peng, "A PID control strategy for dc-link boost voltage in z-source inverter," in *APEC 07 22th Annu. IEEE Applied Power Electronics Conf. and Expo.*, Anaheim, CA, USA, 25 Feb. -1 March, 2007, pp. 1145-1148.
- [10] T. Chandrashekhar and M. Veerachary, "Control of single-phase z-source inverter for a grid connected system," in *3rd Int. Conf. Power Systems*, Kharagpur, India, Dec. 27-29, 2009, pp. 1-6.