



Inversor de Fuente de Voltaje Híbrido Monofásico de Alta Eficiencia para Aplicaciones en FV

Juan Antonio Verdin Cruz
antonio.javc5@gmail.com
Gerardo Vázquez Guzmán
gerardo.vazquez@itesi.edu.mx

Resumen

Entre los sistemas de generación de energía eléctrica de baja potencia, los microinversores (MI) se diseñan para inyectar la energía generada de un sistema FV a la red eléctrica. Un módulo fotovoltaico puede suministrar alrededor de 35V por consiguiente los MI se diseñan generalmente de 2 etapas. La primera etapa eleva y regula el voltaje de corriente directa (CD), mientras que la segunda produce la corriente alterna (CA) que se inyecta a la red eléctrica. Una topología básica utilizada en la segunda etapa es un inversor puente H. En este documento se propone un inversor puente H híbrido de alta eficiencia, el cual utiliza una combinación entre MOSFET's e IGBT's. La propuesta se evaluará principalmente mediante resultados numéricos y una comparación con otras topologías sin transformador, considerando como principales parámetros de comparación la distorsión armónica total (THD) y la eficiencia del inversor.



Introducción

El proyecto presentado se conforma de una propuesta de inversor basada en una topología puente H modificada, se propone utilizar una combinación de dispositivos MOSFET's e IGBT's. La estrategia de conmutación para los dispositivos MOSFET se realiza mediante la modulación por ancho de pulso (PWM) de alta frecuencia, mientras que los dispositivos IGBT conmutaran a baja frecuencia o a la frecuencia de la red eléctrica con el fin de disminuir las pérdidas del sistema y aumentar la eficiencia. El inversor propuesto consiste en dos MOSFET's de carburo de silicio (SiC), dos IGBT'S y cuatro diodos de carburo de SiC frecuencia.

Objetivos

- 1) Diseñar un inversor con las características adecuadas para aplicaciones en sistemas FV de baja potencia.
- 2) Implementar una estrategia de modulación para reducir las pérdidas y aumentar la eficiencia del sistema.

Justificación

En la actualidad los sistemas FV son una alternativa competitiva en el mercado de la generación de energía eléctrica, tanto en sistemas independientes como en sistemas conectados a la red debido al desarrollo tecnológico y la reducción del costo de la tecnología fotovoltaica [1], además de que cuentan con las siguientes características [2,3]: 1) mejor producción de energía; 2) mejor eficiencia del sistema; 3) instalación menos costosa; 4) operación plug-&-play; 5) mayor flexibilidad y modularidad. En años recientes dos puntos de enfoque para los investigadores hacia los microinversores son: a) desarrollar nuevas topologías y b) mejorar la eficiencia [4,5]. Generalmente, un microinversor suele conectarse a un único panel, sin embargo, existen microinversores los cuales pueden conectarse a dos paneles a la vez.

Debido a que su conexión es de un inversor por panel, el mayor reto que se tiene es que los inversores tengan una vida útil que coincida con la del panel fotovoltaico, es decir, alrededor de 25 años. Por lo tanto, el logro de una alta fiabilidad y larga vida útil de los microinversores es de suma importancia y debe ser una de las principales prioridades [6].

Metodología

El circuito de potencia para el inversor híbrido se muestra en la Fig. 1. Como se puede observar consta de dos MOSFET's (S_3 y S_4), dos IGBT's (S_1 y S_2) y cuatro diodos (D_1 a D_4). El objetivo de utilizar D_1 y D_2 es deshabilitar la operación del diodo interno de S_3 , mientras que los diodos D_3 y D_4 se usan para bloquear el diodo parásito de S_4 . Por tanto, las características ineficientes de estos elementos se evitan.

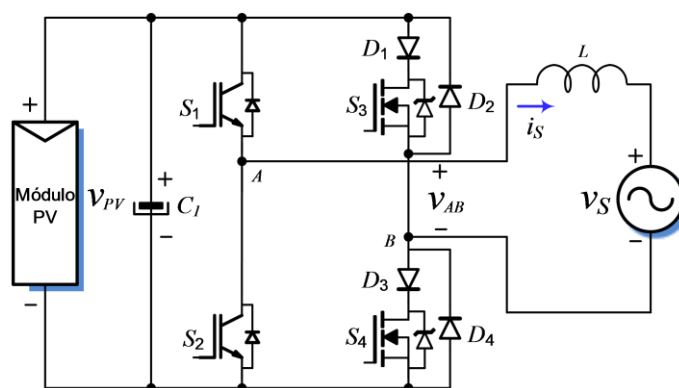


Fig. 1. Inversor puente H propuesto de alta eficiencia monofásico de alta frecuencia.

Análisis de la topología propuesta

Durante el semi-ciclo positivo S_1 , S_4 y D_3 permiten la trayectoria de corriente de carga (considerando una carga predominantemente inductiva) e imponen una diferencia de voltaje positivo entre las terminales de la carga. Por otro lado, cuando no existe una diferencia de voltaje en la carga, se habilita el flujo libre de corriente a través de S_1 y D_2 . Además, durante el semi-ciclo negativo D_1 , S_3 y S_2 permiten una diferencia de voltaje negativo a través de la carga y por ende la trayectoria de corriente de carga. Por otra parte, cuando la diferencia de voltaje a través de la carga es cero, el flujo de la

carga se habilita a través de S_2 y D_4 . La descripción anterior se ilustra en la Fig. 2 la cual presenta los modos de operación (a) y (b) del inversor, donde (a) corresponde a los estados de conmutación durante el semi-ciclo positivo y (b) corresponde a los demás estados de conmutación usados durante el semi-ciclo negativo.

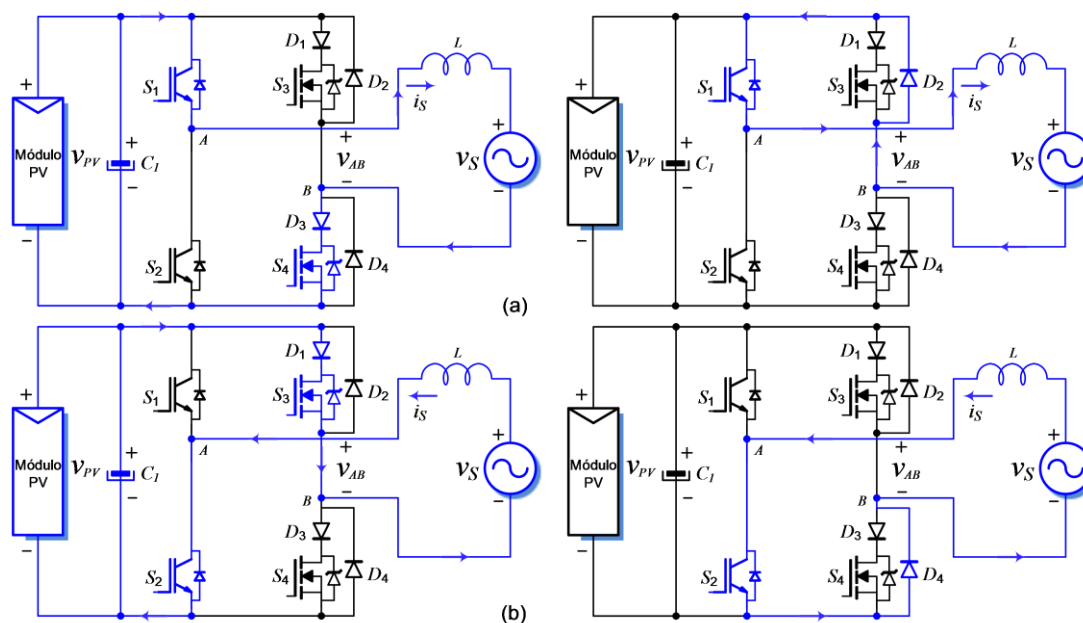


Fig. 2. Modos de operación del inversor híbrido monofásico propuesto.

Cabe resaltar que durante el estado activo en el semi-ciclo positivo D_1 opera con un voltaje de bloqueo igual a cero, mientras que S_3 y D_2 están bloqueando V_{PV} . Por lo contrario, durante el semi-ciclo negativo D_3 opera con un voltaje de bloqueo igual a cero y S_4 y D_4 bloquean el voltaje V_{PV} . Entonces, se puede esperar que D_1 y D_3 no incrementen significativamente las pérdidas por conmutación.

La propuesta de conmutación PWM se implementó usando el PWM sinusoidal convencional (SPWM), donde se compara una señal de referencia sinusoidal con una señal portadora triangular. La propuesta de SPWM se diseñó con el fin de que sea capaz de entregar tres niveles de voltaje a la salida del convertidor i.e. $V_{AB} = V_{PV}$, $V_{AB} = 0$ y $V_{AB} = -V_{PV}$.



Las señales de control obtenidas principalmente por la comparación del voltaje de referencia y la señal portadora se manipularon con el fin de hacer que S_3 y S_4 operen a alta frecuencia y que S_1 y S_2 operen a frecuencia de la red. Las señales de modulación resultante se representan en la Fig. 3. Como se puede observar, durante el semi-ciclo positivo los estados representados en Fig. 2 (a) son combinados alternativamente para generar la salida de voltaje deseada. Por otro lado, durante el semi-ciclo negativo los estados representados en Fig. 2 (b) también se combinan alternativamente para generar los voltajes de $0 V$ y $-V_{PV}$.

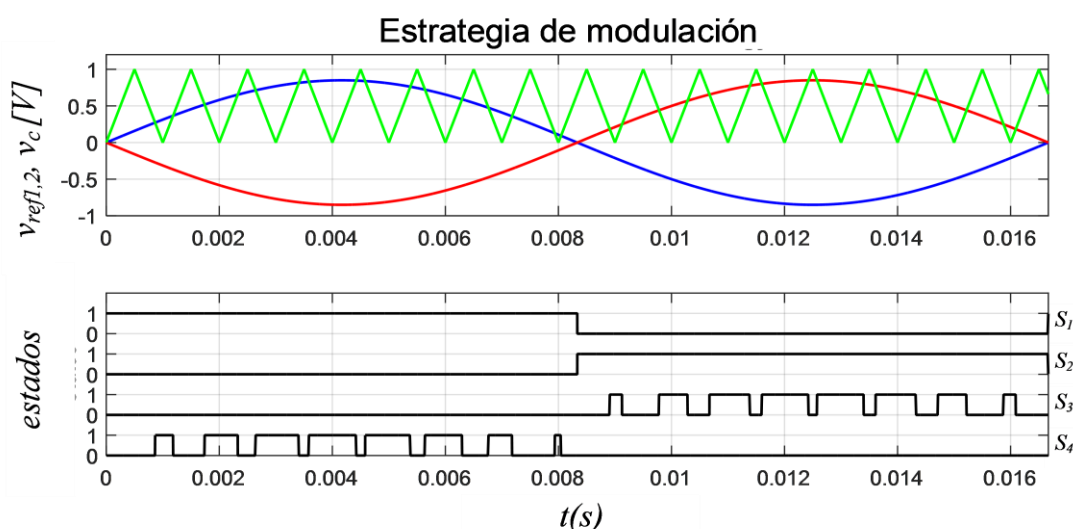


Fig. 3. Señales de modulación de la estrategia PWM propuesta.

Resultados

La topología del convertidor propuesto mostrado en Fig. 1 se implementó en una simulación numérica desarrollada en el software PSIM. Los parámetros usados se enlistan en la Tabla 1. Los resultados de simulación para V_{AB} e i_S se observan en Fig. 4. De la Fig. 4 se puede observar que el voltaje de salida tiene tres niveles de voltaje como se mencionó, así mismo la corriente de salida tiene una forma de onda sinusoidal más el rizo de conmutación. Además, puede notarse que la frecuencia de conmutación (f_{SW}) es más grande respecto a las topologías convencionales, por tanto, el rizo de corriente es menor y por consiguiente la THD también disminuye lo cual se demostrará más tarde.



Tabla 1. Parámetros para la implementación numérica.

Parámetro	Valor
V_{PV}	250 V
R	25 Ω
L	1.5 mH
f_{SW}	30 kHz
f_{red}	60 Hz

Con el fin de realizar el análisis comparativo con respecto a la eficiencia y THD, se incluyen dos topologías convencionales. La primera es el inversor puente H convencional con SPWM unipolar. Esta topología es usada generalmente en dos tipos de microinversores (aislados y sin aislamiento o sin transformador) [7,8]. La segunda topología considerada es el inversor HERIC (Highly Efficient and Reliable Inverter Concept) el cual es usado en aplicaciones sin transformador [9,10]. Ambos circuitos se representan en Fig. 6. La principal diferencia entre el inversor HERIC y la topología convencional es que el inversor HERIC puede producir los mismos tres niveles de voltaje de salida que la topología convencional con una corriente de fuga a tierra mínima.

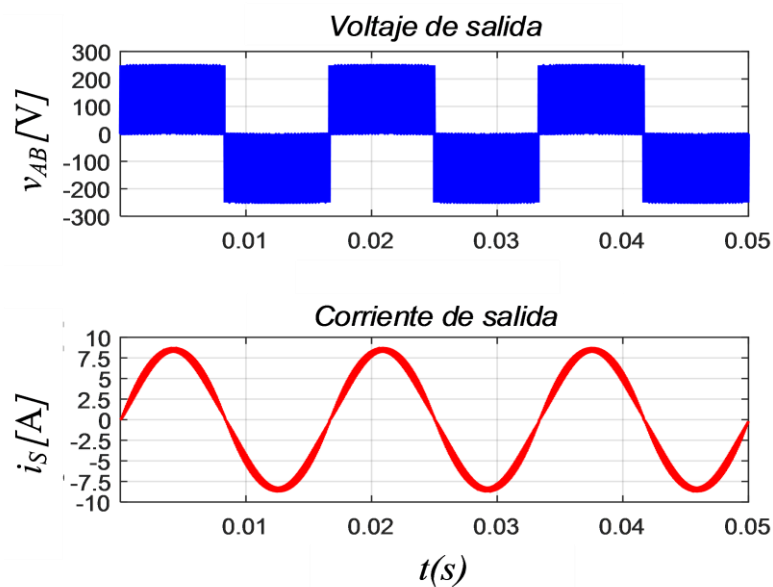


Fig. 4. Voltaje de salida (V_{AB}) y corriente de salida (i_s) del circuito propuesto.

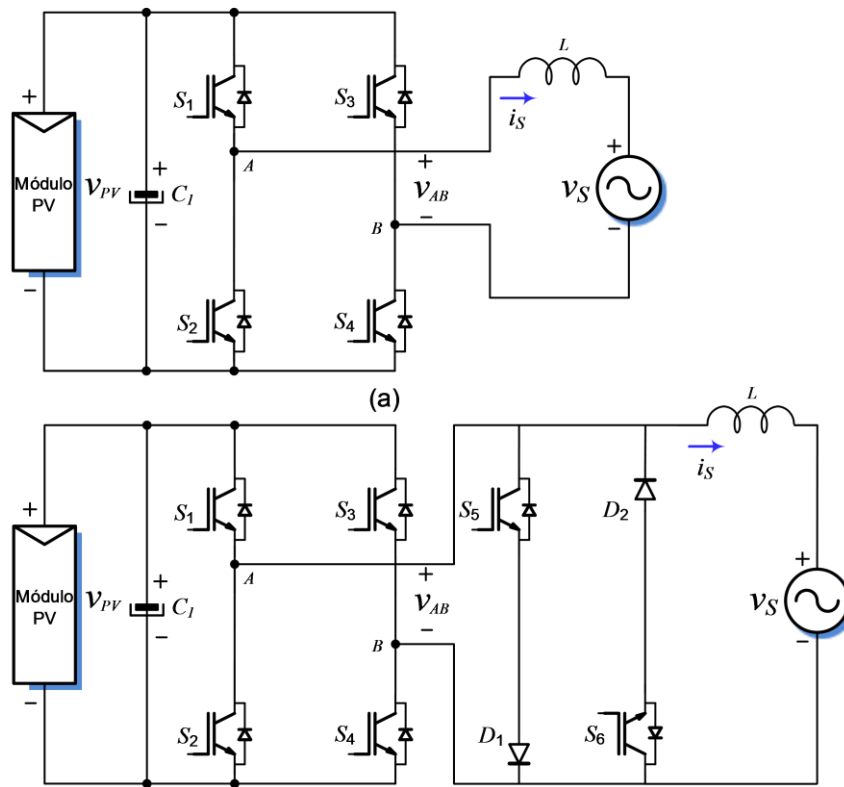


Fig. 5. (a) Inversor puente H y (b) Inversor HERIC.

Las simulaciones numéricas fueron desarrolladas bajo las mismas condiciones, excepto la frecuencia de conmutación la cual es definida a 10 kHz tanto para el inversor puente H como para el HERIC con fin de considerar las ventajas del circuito propuesto con respecto al THD. La transformada rápida de Fourier (FFT) de la corriente de salida de los tres inversores se muestran en la Fig. 5, se nota que el inversor propuesto tiene un mejor desempeño de acuerdo con la THD de corriente que los convertidores convencionales, el valor de THD para el inversor propuesto es aproximadamente 5.02% mientras que los inversores puente H y HERIC tienen 7.5% y 14.66% respectivamente.

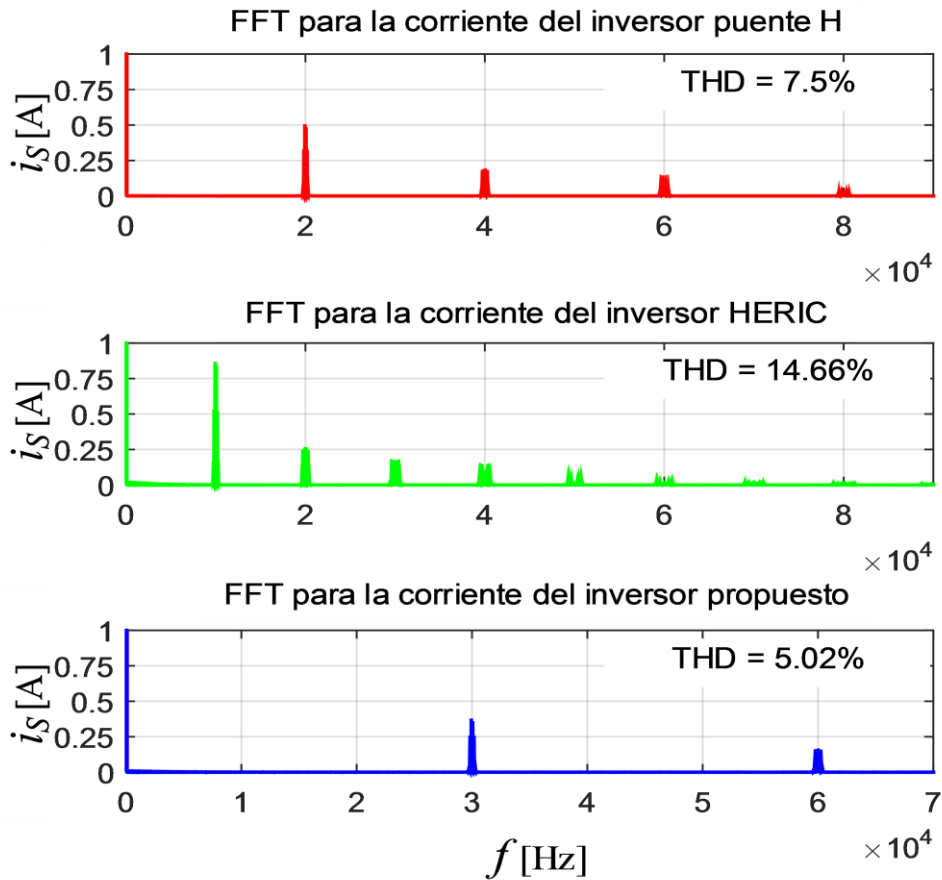


Fig. 6. FFT de la corriente de salida para los tres inversores comparados.

Con respecto a la eficiencia las tres topologías también fueron simuladas utilizando el modelo térmico del software PSIM. Los modelos de los semiconductores seleccionados se incluyeron con el fin de calcular las pérdidas dinámicas y estáticas.

El modelo de los IGBT seleccionado para la simulación fue FGH20N60UFD de la compañía ON Semiconductor, el modelo para los MOSFET's fue C2M0080120D y el modelo de los diodos fue C3D16065D ambos de la compañía CREE.



Los resultados de la simulación considerando las pérdidas en los dispositivos se resumen en la Fig. 7, en la cual se puede observar que el inversor propuesto presenta una mejor eficiencia que el puente H convencional, aunque el inversor HERIC tiene una eficiencia mayor que el inversor propuesto. Sin embargo, el inversor HERIC requiere dos señales de control adicionales así como dos semiconductores extras, lo que repercute en el incremento del costo del sistema. La Tabla 2 muestra los resultados con respecto al THD y la eficiencia en los inversores analizados.

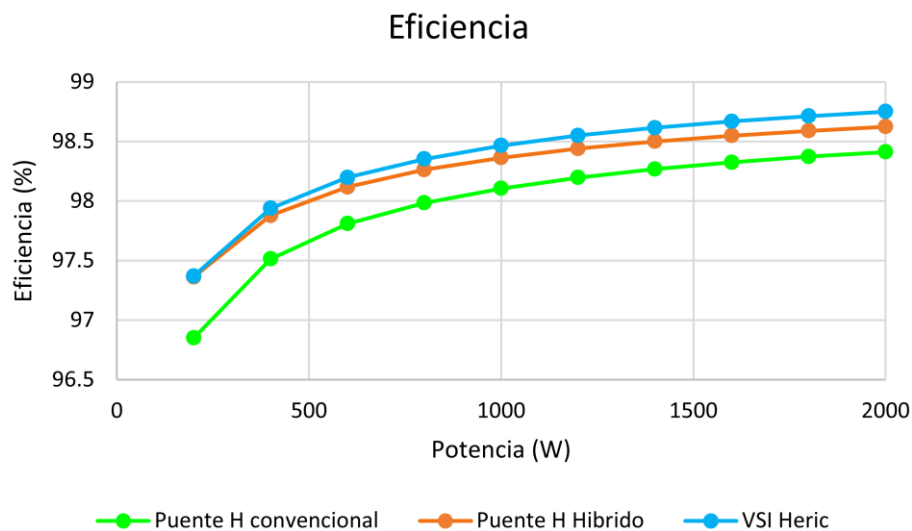


Fig. 7. Resultados de simulación para la eficiencia de los tres inversores evaluados.

Tabla 2. Resumen del THD y la eficiencia para las topologías analizadas.

Topología	THD (%)	Eficiencia (%)
Puente-H	7.5%	97%
HERIC	14.66%	98.5%
Inversor Híbrido	5.02%	98.3%

Conclusiones

Se presentó un inversor híbrido monofásico y la estrategia de control PWM del mismo. El convertidor propuesto se basa en una topología de puente H clásica para el cual se demostró que es factible su utilización en donde la eficiencia sea un parámetro importante.



La implementación del convertidor propuesto utiliza dos IGBT's, dos MOSFET's y cuatro diodos.

Para la selección de los dispositivos mencionados se tomó en cuenta la característica de alta eficiencia y alta frecuencia, siendo esta última la idea principal de la utilización de MOSFET's en el inversor. Los resultados numéricos obtenidos son satisfactorios debido a que el inversor híbrido propuesto presentó una THD menor que las topologías analizadas. Por otra parte, la estrategia de modulación PWM se manipulo para poder conmutar selectivamente los interruptores, por ejemplo, los MOSFET's a alta frecuencia y los IGBT's a baja frecuencia.

Referencias

- [1] Almasoudi, F. M., Alatawi, K. S., & Matin M. (2016). Design of isolate interleaved boost DC-DC converter based on SiC power devices for microinverter applications. *North American Power Symposium (NAPS)*, 1-6.
- [2] Kjaer, S. B., Pedersen, J. K., & Blaabjerg F. (2005). A review of single-phase grid-connected inverters for photovoltaic modules. *IEE Trans. Ind. Appl*, 41(5), 1292-1306. doi: 10.1109/TIA.2005.853371
- [3] Wolfs. P., & Wolfs Q. Li. (2008). A review of the single phase photovoltaic module integrated converter topologies with three different dc link configurations. *IEEE Trans. Power Electron.*, 23(3), 1320-1333. doi: 10.1109/TPEL.2008.920883
- [4] Zhao, Z., Xu, M., Chen, Q. L., Lai, S., & Cho, Y. (2012). Derivation, analysis, and implementation of a boost-buck converter-based high-efficiency PV inverter. *IEEE Trans. Power Electron.*, 27(3), 1304-1313. doi: 10.1109/TPEL.2011.2163805
- [5] Chiu, H., Lo, Y., Yang, C., Cheng, S., Huang C., Kou, M., Huang, Y., Jean, Y., & Huang, Y. (2013). A module-integrated isolated solar micro-inverter. *IEEE Trans. Ind. Electron.*, 60(2). 781-788.



- [6] Hu, H., Harb, S., Kutkut, N. H., Shen, Z. J., & Batarseh, I. (2012). A Single-Stage Microinverter Without Using Electrolytic Capacitors. *IEEE Trans. Power Electro.*, 28(6), 2677-2687. doi: 10.1109/TPEL.2012.2224886
- [7] Melo, F. C., Garcia, L. S., de Freitas, L. C., Coelho, E. A. A., Farias, V. J., & de Freitas L. C. G. (2018). Proposal of a Photovoltaic AC-Module With a Single-Stage Transformerless Grid-Connected Boost Microinverter. *IEEE Trans. Ind. Electron.*, 65(3), 2289-2301. doi: 10.1109/TIE.2017.2750611
- [8] de Morais, J. C. d. S., de Morais, J. L. d. S., & Gules, R. (2019). Photovoltaic AC Module Based on a Cuk Converter With a Switched-Inductor Structure. *IEEE Trans. Ind. Electron.*, 66(5), 3881-3890. doi: 10.1109/TIE.2018.2856202
- [9] Xia, H. F., Zhang, L., & Li, Y. (2017). A Zero-Voltage-Transition HERIC-Type Transformerless Photovoltaic Grid-Connected Inverter. *IEEE Trans. Ind. Electron.*, 64(2), 1222-1232. doi: 10.1109/TIE.2016.2611574
- [10] Freddy, T. K. S., Lee, J., Moon, H., Lee, K., & Rahim, N. A. (2017). Modulation Technique for Single-Phase Transformerless Photovoltaic Inverters With Reactive Power Capability. *IEEE Trans. Ind. Electron.*, 64(9), 6989-6999. doi: 10.1109/TIE.2017.2686366