

REDUCCIÓN DE CORRIENTE DE FUGA EN INVERSOR TRIFASICO PARA APLICACIONES FOTOVOLTAICAS

DECREASE OF THE LEAKAGE CURRENT ON THREE-PHASE INVERTER FOR PHOTOVOLTAIC APPLICATIONS

Elizabeth Espitia

Tecnológico Nacional de México en Celaya
espitia.e@hotmail.com

Héctor López

Tecnológico Nacional de México en Celaya
hector.lopez@itcelaya.edu.mx

Nimrod Vázquez

Tecnológico Nacional de México en Celaya
n.vazquez@ieee.org

Joaquín Vaquero

Universidad Rey Juan Carlos
joaquin.vaquero@urjc.es

Resumen

Hoy en día, el estudio sobre los inversores sin transformador conectados a la red se ha incrementado, los principales aspectos considerados son el patrón de conmutación, la topología, los filtros y también el controlador. Ciertamente, uno de los principales aspectos es eliminar o reducir la corriente de fuga generada por la capacitancia parásita inherente a un sistema fotovoltaico. Este artículo se centra en la reducción de la corriente de fuga de un inversor trifásico sin transformador cambiando de forma sencilla la conexión del filtro de salida. Los resultados de simulación validan la propuesta.

Palabra(s) Clave: Capacitor parásito, corriente de fuga, sin transformador, inversor trifásico.

Abstract

Nowadays, the study about grid connected transformerless inverters has been increased, the main aspects considered are the switching pattern, the topology, the

filters, and also the controller. Certainly, the main concern is to eliminate or to reduce the leakage current generated in the parasitic capacitance inherent in a photovoltaic system and, therefore, achieve safety requirements. This paper focuses on a leakage current reduction of a three-phase transformerless inverter by simple changing the connection of the output filter. Simulation results validate the proposal.

Keywords: Leakage current, photovoltaic system (PV), parasitic capacitance, transformerless, three-phase full-bridge.

1. Introducción

La población y la industria demandan cada vez más energía, y desafortunadamente los métodos tradicionales para la generación de energía se basan en combustibles fósiles. Los investigadores están tratando de evitar los efectos negativos de los métodos tradicionales, estudiando fuentes renovables como los sistemas fotovoltaicos, pero también para satisfacer la demanda de energía.

Un sistema fotovoltaico está compuesto básicamente por un panel solar y una etapa de conversión de potencia. La etapa de potencia suele ser un inversor que funciona como un seguidor de máxima potencia, pero como una fuente de corriente conectada a la red de CA. El uso de sistemas fotovoltaicos sin transformador se ha sugerido en los últimos años, debido a la ventaja de la reducción del costo, el peso, el tamaño y el incremento de la eficiencia con respecto a los esquemas que consideran el transformador de baja frecuencia [1].

Sin embargo, la corriente de fuga del panel fotovoltaico, a través de la puesta a tierra, es la principal desventaja de eliminar el transformador, adicional a la seguridad. La ruta de la corriente de fuga se ilustra en figura 1, esta corriente reduce el tiempo de vida útil del panel fotovoltaico, incrementa las pérdidas, pero también aumenta la interferencia y el ruido [2]. Para reducir este problema, la norma establece límites para esta corriente, la norma alemana DIN VDE V 0-126-1-1, establece que la corriente debe ser inferior a 300 mA (pico) [3].

En los últimos años, se han propuesto diferentes esquemas para eliminar o reducir la corriente de fuga [4-6]. Algunas nuevas topologías se han propuesto, otras

proponen usar una técnica de modulación especial. Otro hecho importante es que, en su mayoría, los investigadores se han centrado en los convertidores monofásicos y pocos trabajos son para sistemas trifásicos.

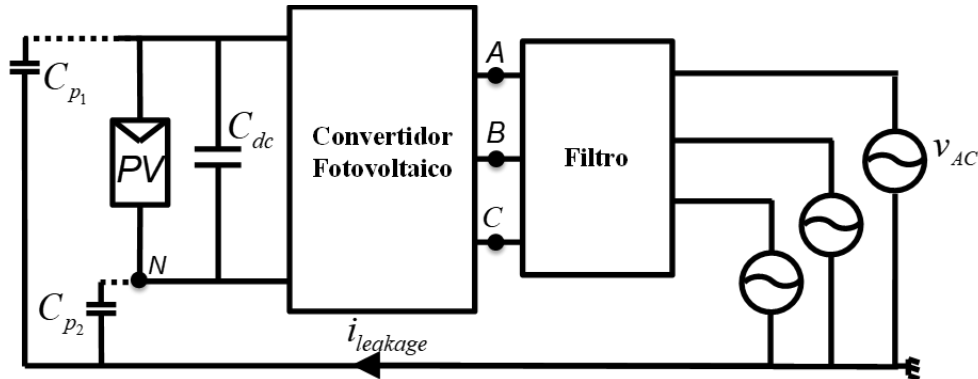


Figura 1 Sistema fotovoltaico conectado a la red en modo común.

En [7] se propone la topología H7 para sistemas trifásicos, este convertidor es en realidad la extensión de un esquema propuesto para un inversor monofásico; La propuesta consiste en desconectar el panel fotovoltaico de la red eléctrica cuando el inversor produce la salida cero, reduciendo así la corriente de fuga. El inversor alimentado en Z se analiza en [8], donde se afirma que la impedancia Z asegura el desacoplamiento del panel fotovoltaico y la red, pero también se propone el uso de una técnica de modulación. La corriente de fuga alcanza valores de 212 mA en ambos casos, la principal desventaja de estos esquemas es el agregado de dispositivos y las pérdidas asociadas a ellos.

En [9,10] se comparan las técnicas de modulación para reducir esta corriente, pero no se consideran más dispositivos que el inversor trifásico tradicional. Las técnicas son SVPWM, AZSPWM, DPWM, NSPEM, RSPWM Y SPWM, donde al final la corriente sigue siendo alta en comparación con los otros métodos. En [11] se propone una nueva técnica de modulación, que solo considera una lógica booleana. El uso de una configuración multinivel de diodo enclavado se propone en [12], donde el punto neutral del convertidor está conectado al neutro de la red y, naturalmente, la corriente de fuga se reduce significativamente, porque se asegura un voltaje constante en la capacitancia parásita. El uso de filtros pasivos se ha considerado

en [13,14], donde se obtienen resultados satisfactorios. En [15] se considera un filtro LCL modificado con un controlador multi-resonante, donde la corriente de fuga es de 172 mA.

En este artículo se estudia un inversor trifásico para inyectar corriente a la red principal, la propuesta reduce la corriente de fuga, pero solo se modifica la conexión del filtro, no se emplean semiconductores adicionales. La propuesta se describe en la sección 2, en la sección 3 se presentan los resultados de simulación. Y finalmente se dan las conclusiones en la sección 4.

2. Desarrollo

La topología propuesta se muestra en la figura 2, la cual consiste en un inversor trifásico alimentado en voltaje (VSI) conectado a la red sin transformador mediante un filtro LC, donde los condensadores son conectados en un punto en común con el inversor que a su vez se encuentra directamente conectado a la terminal negativa del panel fotovoltaico. Además la topología está compuesta de un capacitor de desacoplo (C_{dc}) entre el panel fotovoltaico y el inversor, seis transistores (S_1, \dots, S_6) conmutados mediante la técnica de modulación sinusoidal (SPWM), un panel solar (V_{pv}), la red eléctrica (V_A, V_B, V_C), y para el filtrado se utilizan inductores (L_a, L_b, L_c), y capacitores (C_a, C_b, C_c). Los capacitores parásitos del panel solar son C_{P1} y C_{P2} .

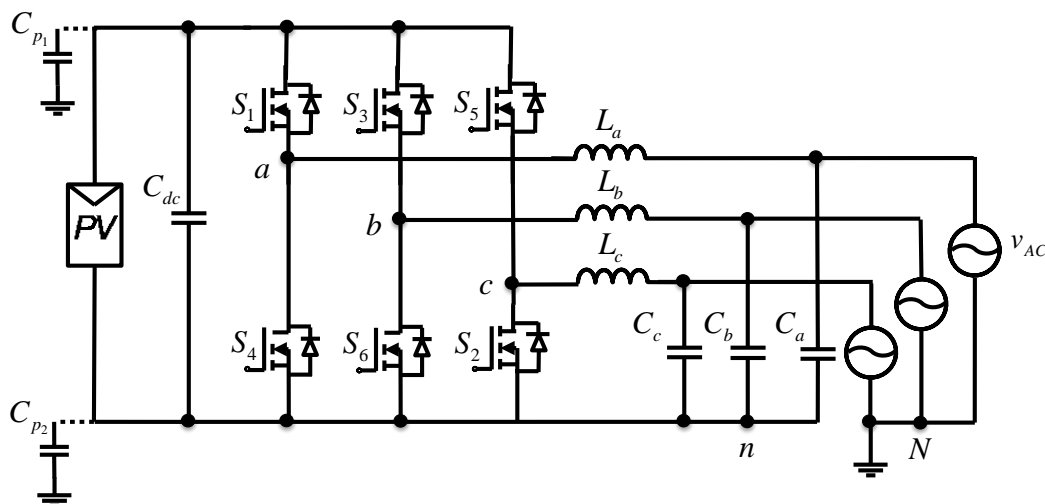


Figura 2 Inversor trifásico sin transformador propuesto.

La salida del inversor está determinada por ecuaciones 1, 2 y 3.

$$V_{an} = S_1 * V_{dc} \quad (1)$$

$$V_{bn} = S_3 * V_{dc} \quad (2)$$

$$V_{cn} = S_5 * V_{dc} \quad (3)$$

Por lo tanto, las tensiones de salida del inversor están determinadas por ecuaciones 4, 5 y 6.

$$V_{ab} = V_{an} - V_{bn} \quad (4a)$$

$$V_{ab} = (S_1 - S_3)V_{dc} \quad (4b)$$

$$V_{bc} = V_{bn} - V_{cn} \quad (5a)$$

$$V_{bc} = (S_3 - S_5)V_{dc} \quad (5b)$$

$$V_{ca} = V_{cn} - V_{an} \quad (6a)$$

$$V_{ca} = (S_5 - S_1)V_{dc} \quad (6b)$$

Considerando los estados de conmutación y las ecuaciones anteriores, se puede determinar la tensión en cada estado de conmutación, las cuales se resumen en la tabla 1. Se emplea una modulación sinusoidal tradicional, con la intención de producir una corriente de la misma forma. Con esta forma de operación se puede utilizar el circuito equivalente mostrado en la figura 3 para el análisis.

Tabla 1 Tensiones de salida.

S₁	S₃	S₅	V_{ab}	V_{bc}	V_{ca}
0	0	0	0	0	0
0	0	1	0	-V _{dc}	V _{dc}
0	1	0	-V _{dc}	V _{dc}	0
0	1	1	-V _{dc}	0	V _{dc}
1	0	0	V _{dc}	0	-V _{dc}
1	0	1	V _{dc}	-V _{dc}	0
1	1	0	0	V _{dc}	-V _{dc}
1	1	1	0	0	0

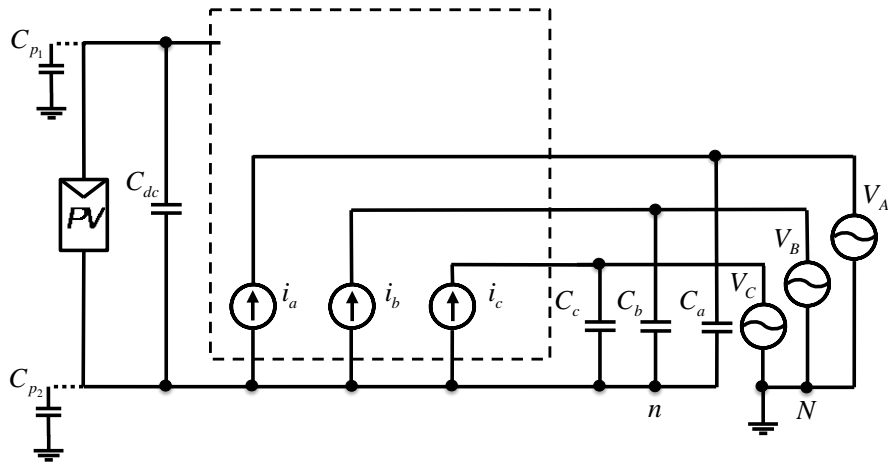


Figura 3 Diagrama simplificado.

Aplicando las leyes de Kirchoff y considerando los capacitores e inductores iguales se obtiene ecuación para el capacitor C_{P1} , ecuación 7.

$$i_{nN} = \frac{V_A + V_B + V_C}{x_p + x_c} + \frac{x_c(i_a + i_b + i_c)}{x_p + x_c} \quad (7)$$

Por lo tanto, para asegurar una corriente de cero en ese capacitor las corrientes y voltajes deben estar balanceados. El capacitor superior tendrá una corriente de casi cero, ya que la tensión del capacitor de desacoplo C_{dc} tiene una tensión casi constante.

El control del sistema fotovoltaico está basado en la transferencia de potencia activa a la red, para ello se debe mantener las corrientes i_{La} , i_{Lb} e i_{Lc} sinusoidales. Se implementa un control de corriente lineal con la transformada dq0 para generar las señales del inversor. El control tiene como característica ser de doble lazo con la capacidad de inyectar potencia activa a la red y al mismo tiempo podría compensar el FP (factor de potencia) al absorber potencia reactiva [16].

En la figura 4 se muestra el diagrama de bloques del control, el cual está compuesto por la etapa de seguimiento del punto de máxima potencia (MPPT, por sus siglas en inglés) que se encarga de mantener la transferencia de máxima energía del panel solar al inversor, además también por medio de un sistema de sincronización (PLL, por sus siglas en inglés) el cual permite obtener señales de control de corriente

sincronizadas de referencia. En el bloque de la transformación dq0 se genera la señal de referencia mediante las ecuaciones de potencia activa, reactiva que definirán la corriente de referencia. Esta señal de referencia es comparada en el bloque control de corriente con la señal de corriente medida en el sistema, y mediante un controlador PI se da compensación al error entre ellas, esto da valor a las señales u_a , u_b y u_c , que generaran los pulsos de conmutación para el inversor.

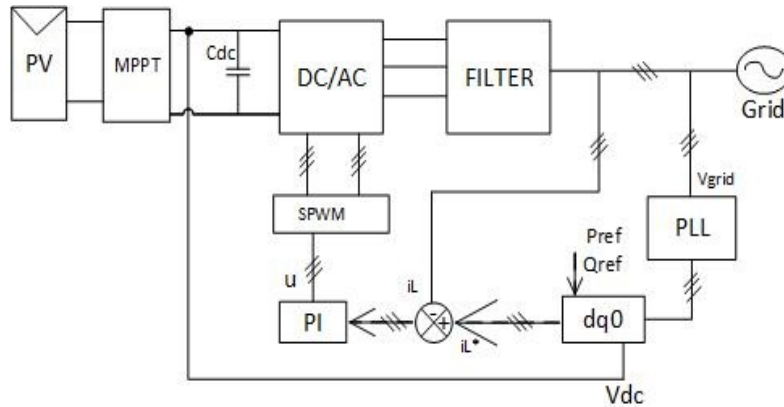


Figura 4 Diagrama de bloques del sistema trifásico conectado a la red.

Mediante un análisis de transferencia de potencia es posible determinar la potencia máxima que es posible inyectar, ya sea activa o reactiva, dependiendo de las necesidades de la misma, como se muestra en la figura 5.

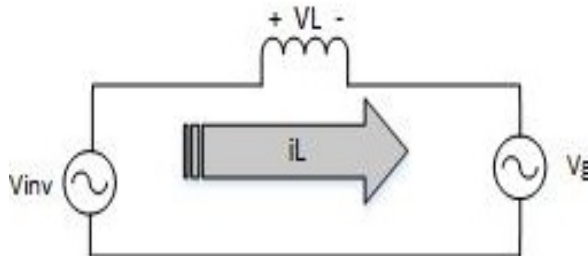


Figura 5 Circuito para análisis de transferencia de potencia.

Las ecuaciones determinadas por el método nos dan a conocer las componentes de la potencia activa y reactiva que es posible inyectar a la red, y como se puede notar, en las ecuaciones 8, el ángulo Φ es quien determina la magnitud de la potencia activa y reactiva del sistema trifásico.

$$P = \frac{3V_p V_{pV} d \sin(\phi)}{4\omega L} \quad (8a)$$

$$\therefore L = \frac{3V_p V_{pV} d \sin(\phi)}{4\omega P} \quad (8b)$$

$$\therefore L = \frac{\frac{3}{2} V_{pV} V_p d \cos(\phi) - 3V_p^2}{2\omega Q} \quad (8c)$$

$$Q = \frac{\frac{3}{2} V_{pV} V_p d \cos(\phi) - 3V_p^2}{2\omega L} \quad (8d)$$

El filtro de salida tiene la función principal de eliminar el componente de alta frecuencia de la etapa de potencia. Para el diseño de este tipo de filtros es recomendable seleccionar la frecuencia de corte alrededor de 10 veces la frecuencia de salida (f_n), pero también 10 veces menor que la frecuencia de conmutación (f_{sw}) [17]. Las ecuaciones 9 y 10 pueden emplearse.

$$10 * f_n \leq f_c \leq \frac{f_{sw}}{10} \quad (9)$$

$$C = \frac{1}{(2 * \pi * f_c)^2 * L} \quad (10)$$

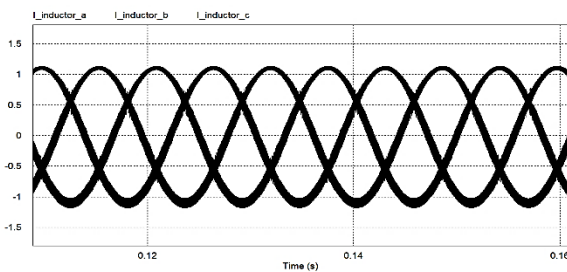
Un aspecto importante de este filtro es que el capacitor tiene la función de asegurar un voltaje constante en la capacitancia parásita del panel fotovoltaico hacia la tierra, esta simple variación de la topología permite asegurar la reducción de la corriente de fuga.

3. Resultados

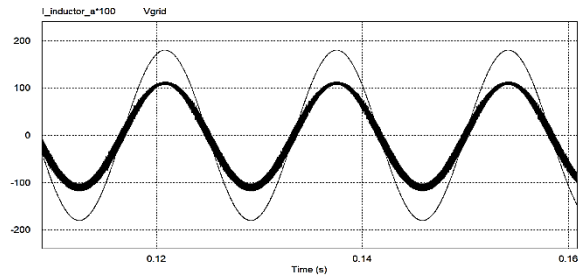
El sistema propuesto fue diseñado y simulado usando PSIM® para confirmar la operación del sistema propuesto. Los parámetros del sistema se muestran en tabla 2. En la figura 6a, se muestran las señales de corriente en el inductor balanceadas de cada rama desfasadas 120°. En 6b, se muestra la señal de voltaje y corriente en fase, y por último en 6c, la forma de onda de la corriente de fuga generada en modo común con la propuesta de reducción, el valor obtenido es de 4.7 mA (rms).

Tabla 2 Valores de los Elementos.

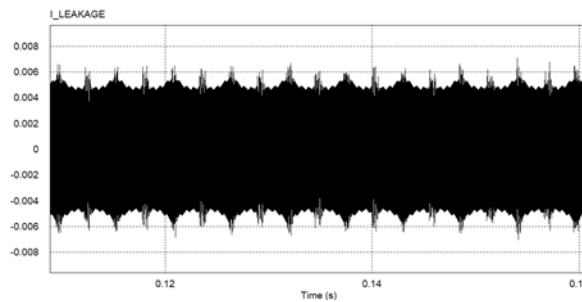
Element	Value	Unit
L a,b y c	1.3	mH
C a,b y c	2.2	μF
Cdc	1000	μF
Cpv	300	nF
Vgrid	180	Vp
F_grid	60	Hz
Vdc	450	Vrms
F_switch	50	kHz



a) Corriente de los inductores.



b) Voltaje de red comparada con corriente inductor.



c) Corriente de fuga.

Figura 6 Formas de onda de salida del inversor.

4. Conclusión

Los sistemas fotovoltaicos conectados a la red requieren ciertos requisitos para la inyección de potencia a la misma. Tal como, la desconexión del modo isla en un tiempo determinado, que la corriente de fuga no puede ser mayor a 300mA, entre otros. En este artículo se propone un esquema que no usa un transformador de aislamiento, que permite inyectar la corriente deseada y reducir significativamente la corriente de fuga. Esto se logra con una simple variación a la forma de conexión del filtro. Para validar la operación se simulo en PSIM®.

5. Bibliografía y Referencias

- [1] E. Gubia, P. Sanchis, A. Ursua, J. Lopez, and L. Marroyo, Ground currents in single-phase transformerless photovoltaic systems, *Progress in photovoltaics: research and applications*, vol. 15, no. 7, nov. 2007, pp. 629-650.
- [2] W. Chen, X. Yang, W. Zhang, and X. Song, Leakage current calculation for PV inverter system based on a parasitic capacitor model, *IEEE Trans. on Power Electron.*, vol. 31, no. 12, Dec. 2016, pp. 8205-8217.
- [3] DKE Deutsche Kommission Elektrotechnik, Automatic Disconnection Device between a Generator and the Public Low-Voltage Grid, Std. DIN VDE 0126, 2006.
- [4] T. Kerekes, R. Teodorescu, M. Liserre, C. Klumpner, and M. Sumner, Evaluation of three-phase transformerless photovoltaic inverter topologies, *IEEE Trans. on Power Electron.*, vol. 24, no. 9, Sept. 2009, pp. 2202-2211.
- [5] A. Hintz, U.R. Prasanna, and K. Rajashekara, Comparative study of the three-phase grid-connected inverter sharing unbalanced three-phase and/or single-phase systems, *IEEE Trans. on Ind. Appl.*, vol. 52, no. 6, Nov. 2016, pp. 5156-5164.
- [6] H. Li, Y. Huang, and J. Lu, Reactive power compensation and DC link voltage control using Fuzzy-PI on grid-connected PV system with d-STATCOM, In *IEEE Power and Energy Engineering Conference (APPEEC)*, 2016 IEEE PES Asia-Pacific, Oct. 2016, pp. 1240-1244.
- [7] T.K.S. Freddy, N.A. Rahim, W.P. Hew, and H.S. Che, Modulation techniques to reduce leakage current in three-phase transformerless H7 photovoltaic inverter, *IEEE Trans. on Ind. Electron.*, vol. 62, no. 1, Jan. 2015, pp. 322-331.
- [8] V. Erginer and M.H. Sarul, "A novel reduced leakage current modulation technique for Z-source inverter used in photovoltaic systems." *IET Power Electron.*, vol 7, no. 3, March 2013, pp. 496-502.
- [9] C.C. Hou, C.C. Shih, P.T. Cheng, and A.M. Hava, Common-mode voltage reduction pulsewidth modulation techniques for three-phase grid-connected converters, *IEEE trans. on Power Electron.*, vol. 28, no. 4, April 2013, pp. 1971-1979.

- [10] M.C. Cavalcanti, K.C. De Oliveira, A.M. De Farias, F.A. Neves, G.M. Azevedo, and F.C. Camboim, Modulation techniques to eliminate leakage currents in transformerless three-phase photovoltaic systems, *IEEE Trans. on Ind. Electron.*, vol. 57, no. 4, April 2010, pp. 1360-1368.
- [11] X. Guo, R. He, J. Jian, Z. Lu, X. Sun, and J.M. Guerrero, Leakage current elimination of four-leg inverter for transformerless three-phase PV systems, *IEEE Trans. on Power Electron.*, vol. 31, no. 3, March 2016, pp. 1841-1846.
- [12] M.C. Cavalcanti, A.M. Farias, K.C. Oliveira, F.A. Neves, and J.L. Afonso, Eliminating leakage currents in neutral point clamped inverters for photovoltaic systems, *IEEE Trans. on Ind. Electron.*, vol. 59, no. 1, Jan. 2012, pp. 435-443.
- [13] O. Lopez, F.D. Freijedo, A.G. Yepes, P. Fernandez-Comesana, J. Malvar, R. Teodorescu, and J. Doval-Gandoy, Eliminating ground current in a transformerless photovoltaic application, *IEEE Trans. on Energy Conversion*, vol. 25, no. 1, March 2010, pp. 140-147.
- [14] J.C. Giacomini, L. Michels, H. Pinheiro, and C. Rech, Active damping of a modified LCL filter applied to transformerless grid-connected PV inverter, *IEEE Power Electron. Conf. and 1st Southern Power Electron. Conf. (COBEP/SPEC)*, 2015, Nov. 2015, pp. 1-6
- [15] J.C. Giacomini, L. Michels, H. Pinheiro, and C. Rech, Active damping scheme for leakage current reduction in transformerless three-phase grid-connected pv inverters, *IEEE Trans. on Power Electron.*, vol. 33, no. 5, March 2018, pp. 3988-3999.