

Integración de energía fotovoltaica a la red eléctrica mediante un inversor multinivel PHC monofásico en condiciones de asimetría

L. F. Díaz-Díaz¹, J. Lara-Cardoso¹, C. Hernandez-Flores¹, M. A. Arjona-López¹

Resumen—La contaminación ambiental debida a la utilización de combustibles fósiles para la producción de energía eléctrica ha fomentado el crecimiento exponencial de la energía solar fotovoltaica en los últimos años. Los inversores electrónicos de potencia convierten la señal de corriente continua de los paneles fotovoltaicos en corriente alterna para ser integrada a la red eléctrica. A diferencia de los inversores binivel, los multinivel operan a una menor frecuencia de conmutación, siendo así más eficientes. Una topología interesante de inversor monofásico de 5-niveles se obtiene conectando dos puentes H en cascada con un arreglo fotovoltaico en cada bus. Sin embargo, cuando el número de paneles difiere entre los arreglos y/o están bajo irradiancias solares desiguales, el control del voltaje en cada puente se pierde totalmente. Este artículo propone una técnica de modulación desplazada en fase que junto con el algoritmo de conductancia incremental soluciona este problema, y además permite extraer con precisión la máxima potencia sin requerir el clásico convertidor elevador, reduciendo así el costo y la complejidad global. Los resultados de simulación obtenidos en Matlab-Sim Power Systems demuestran el buen desempeño del método propuesto para integrar a la red una corriente senoidal de alta calidad incluso en condiciones de asimetría.

Palabras claves—energía fotovoltaica, inversor multinivel PHC, fuentes asimétricas, modulación desplazada en fase, red eléctrica monofásicas

Abstract—Environmental pollution due to the use of fossil fuels for the generation of electrical energy has fostered the exponential growth of photovoltaic solar energy in last years. Power electronic inverters convert the direct current signal from the photovoltaic panels into alternating current to be integrated to the grid. Unlike bi-level inverters, multilevel ones operate at a lower switching frequency, thus being more efficient. An interesting 5-level single-phase inverter topology is obtained by connecting two cascaded H-bridges with a photovoltaic array on each bus. Nevertheless, when the number of panels differs between the arrays and/or they are under unequal solar irradiances, the control of the voltage in each bridge is totally lost. This article proposes a phase-shifted modulation technique that along with the incremental conductance algorithm solves this problem, and further allows accurately extracting the maximum power without requiring the classic boost converter, thus reducing the cost and the overall complexity. The simulation results obtained in Matlab-SimPowerSystems demonstrate the good performance of the proposed method for integrating a high-quality sinusoidal current to the grid even under asymmetry conditions.

Keywords— *asymmetric sources, CHB multilevel inverter, phase-shifted modulation, photovoltaic energy, single-phase grid*

I. INTRODUCCIÓN

Actualmente la energía fotovoltaica se posiciona como una alternativa factible y que siempre está en constante evolución tecnológica. Los dos elementos básicos de un sistema de generación de energía fotovoltaica son: 1) un conjunto de paneles solares interconectados entre sí formando un arreglo serie/paralelo que permite aumentar su capacidad total de voltaje y corriente, y 2) un inversor electrónico de potencia (IEP) que convierte la señal de voltaje de corriente directa (CD) proveniente de los paneles fotovoltaicos en una señal de corriente alterna (CA) para poder ser integrada a la red eléctrica [1]. Este inversor también lleva a cabo la función de regulación de la potencia transferida a la red. La identificación del ángulo o fase de la red requerida para la sincronización en esta transferencia de energía se obtiene utilizando un lazo enganchado en fase (PLL - *phase locked loop*) [2].

Los sistemas fotovoltaicos requieren de un algoritmo de seguimiento del punto de máxima potencia (MPPT - *maximum power point tracking*) para extraer el máximo de la energía producida por los paneles fotovoltaicos a pesar de las variaciones de irradiancia solar y temperatura [3]. En la literatura se encuentra una amplia variedad de algoritmos MPPT, tales como: perturbación/observación (P&O), capacitancia parásita, conductancia incremental, entre muchos más [4]. Variando el voltaje del bus de CD del inversor es posible implementar simultáneamente el algoritmo MPPT, excluyendo así el convertidor elevador de CD y reduciendo el costo y complejidad del sistema total [5].

En comparación con los IEP binivel tradicionales, los IEP multinivel (MN) son capaces de proveer una señal de voltaje con una menor distorsión armónica y utilizando una frecuencia de switcheo mucho más baja, lo que conlleva a un menor volumen y costo del filtro pasivo de salida requerido, así como a una reducción considerable de las pérdidas de conmutación [6]. Por lo que, en sistemas fotovoltaicos de gran potencia, los IEP MN resultan muy atractivos pues representan menores pérdidas, así como una mayor eficiencia

¹ División de Estudios de Posgrado e Investigación, TNM Instituto Tecnológico de La Laguna, Blvd. Revolución y Av. Instituto Tecnológico de La Laguna, C.P. 27000, Torreón, Coahuila, México.

* m.lfdiazf@correo.itlalaguna.edu.mx

y ahorro de energía. Además, los IEP MN presentan un menor estrés dV/dt en sus switches de potencia, una menor interferencia electromagnética, y en general permiten alcanzar un mejor desempeño del sistema donde están conectados [7].

La interconexión del inversor del sistema fotovoltaico con la red eléctrica, tradicionalmente utiliza un transformador de línea que trabaja a la frecuencia de la red, *i.e.*, 60Hz. Debido a esta baja frecuencia de operación, inevitablemente es voluminoso, pesado y costoso [8]. La utilización de IEP MN en combinación con configuraciones en cascada permite conectarlos directamente a los altos voltajes de la red eléctrica, eliminando la necesidad del transformador y logrando así un menor peso, un ahorro económico, una disminución de espacio y un aumento en la eficiencia del sistema [9]. Sin embargo, esta configuración denominada "*transformerless*" o sin transformador también elimina la seguridad provista por su aislamiento galvánico [10].

La topología de puentes H en cascada (PHC) también llamada CHB (*cascaded H-bridges*) tiene las ventajas de modularidad, así como alimentar cada puente H con una fuente independiente de voltaje lo que es conveniente en esta aplicación [11]. Además, se puede implementar un algoritmo MPPT para cada arreglo fotovoltaico, lo que permite alcanzar una mejor eficiencia que utilizando un solo MPPT central [12]. Sin embargo, la topología PHC tiene la desventaja del desbalance de voltaje entre sus buses de CD, el cual se presenta cuando los arreglos fotovoltaicos en cada bus son asimétricos o al recibir irradiancias solares diferentes. En la literatura se encuentran diferentes métodos de control y algoritmos para corregir este fenómeno [13].

En este trabajo se presenta un sistema fotovoltaico conectado a la red eléctrica a través de un inversor PHC de 5 niveles donde los arreglos fotovoltaicos en sus 2 puentes H son asimétricos. Además, se propone una técnica de control de balanceo de los buses de CD del convertidor, la cual se basa en comparar el voltaje del bus con el voltaje de referencia que provee el MPPT, y en base al error obtenido se modifica la estrategia PWM de desplazamiento en fase para lograr mantener el voltaje deseado.

El presente artículo se organiza de la siguiente manera. La sección II incluye el modelo de simulación, el cual incluye el arreglo fotovoltaico, el algoritmo MPPT, el inversor PHC de 5 niveles, el control de voltaje y la conexión a la red eléctrica, así como la modulación PWM y el control de balanceo. En la sección III se presentan los resultados de simulación obtenidos donde se muestra el correcto balanceo de voltaje en los buses de CD del inversor multinivel, además de las corrientes y potencias generadas. Para finalizar, en la sección IV se exponen las conclusiones.

II. PARTE TÉCNICA DEL ARTÍCULO

El modelo de simulación diseñado en MATLAB/SIMULINK es un sistema fotovoltaico conectado a la red eléctrica de 240V mediante un inversor multinivel. La topología utilizada es de 2 puentes H conectados en cascada y en cada puente se conecta un arreglo fotovoltaico asimétrico. Para comprender el modelo, éste se divide en las siguientes 5 partes: el arreglo fotovoltaico, el algoritmo MPPT, el inversor PHC, el control y la conexión a la red, y por último la modulación PWM y el control de balanceo.

A. Arreglo Fotovoltaico

El panel fotovoltaico (PV) utilizado en la simulación es el modelo Conergy PH 255P proporcionado por el bloque PV Array de Matlab-SimPowerSystems, el cual tiene bajo condiciones estándar las características eléctricas que se muestran en la Tabla I.

TABLA I. CARACTERÍSTICAS ELÉCTRICAS DEL PANEL FOTOVOLTAICO

| MODELO PANEL CONERGY PH 255P | | | |
|------------------------------|--|--------|---|
| P_m | Potencia máxima | 255.56 | W |
| V_{oc} | Voltaje de circuito abierto | 38.4 | V |
| V_{mp} | Voltaje en el punto de máxima potencia | 30.68 | |
| I_{sc} | Corriente de corto circuito | 8.69 | A |
| I_{mp} | Corriente en el punto de máxima potencia | 8.33 | |

En el primer arreglo fotovoltaico se tienen dos ramas con siete paneles conectados en serie. Mientras que el segundo arreglo se compone de dos ramas con cinco paneles fotovoltaicos cada una. Las ecuaciones de la potencia (1), el voltaje (2) y la corriente (3) que proporcionan estos arreglos fotovoltaicos está dado por:

$$P_{arreglo} = N_{PV} * P_m \tag{1}$$

$$V_{arreglo} = N_{PVserie} * V_{mp} \tag{2}$$

$$I_{arreglo} = N_{PVparalelo} * I_{mp} \tag{3}$$

donde N_{PV} es el número total de paneles en el arreglo, $N_{PVserie}$ es el número de paneles en serie y $N_{PVparalelo}$ el número de ramas en paralelo.

En la Tabla II se muestran los valores de potencia, voltaje y corriente de cada uno de los arreglos fotovoltaicos utilizado en la simulación.

TABLA II. CARACTERÍSTICAS DE LOS ARREGLOS FOTOVOLTAICOS

| | ARREGLO 1 | ARREGLO 2 | UNIDADES |
|------------------------|-----------|-----------|----------|
| # de paneles en serie | 9 | 7 | - |
| # de ramas en paralelo | 2 | 2 | |
| P_m | 2300 | 1788.95 | W |
| V_{mp} | 276.12 | 214.76 | V |
| I_{mp} | 16.66 | 16.66 | A |

B. Algoritmo MPPT

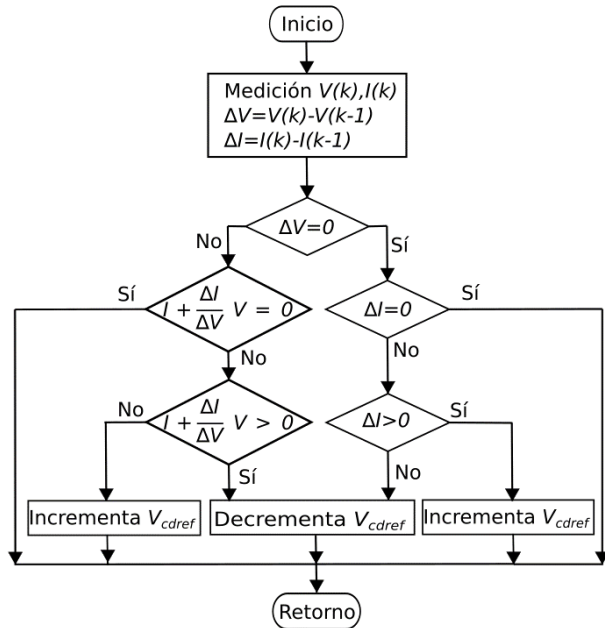


Figura 1. Diagrama de flujo del algoritmo de conductancia incremental.

El algoritmo seleccionado es de conductancia incremental, el cual se muestra en el diagrama de flujo de la Figura 1. Este método se basa en comparar la conductancia incremental con la conductancia instantánea de cada arreglo fotovoltaico a partir del voltaje V y la corriente I . Como resultado se obtiene una salida de voltaje de referencia V_{cdfref} .

Con base en la evaluación de (4), el método determina si se debe aumentar o disminuir el voltaje cuando se tiene un valor diferente de 0. El punto óptimo se alcanza cuando se cumple esta igualdad.

$$\frac{dI_{pv}}{dV_{pv}} = -\frac{I_{pv}}{V_{pv}} \quad (4)$$

donde I_{pv} y V_{pv} son la corriente y el voltaje del arreglo fotovoltaico, respectivamente.

En la Tabla III se resume el funcionamiento del algoritmo MPPT de conductancia incremental. Ahí se indican los 3 casos en los cuales se puede ubicar el punto de referencia sobre la curva de potencia versus voltaje.

TABLA III. POSICIÓN DEL PUNTO DE MÁXIMA POTENCIA EN EL ALGORITMO DE CONDUCTANCIA INCREMENTAL

| CASO | POSICIÓN |
|--|---|
| $\frac{\Delta I}{\Delta V} = -\frac{I}{V}$ | Se encuentra en el punto de máxima potencia. |
| $\frac{\Delta I}{\Delta V} > -\frac{I}{V}$ | Se encuentra a la izquierda del punto de máxima potencia. |
| $\frac{\Delta I}{\Delta V} < -\frac{I}{V}$ | Se encuentra a la derecha del punto de máxima potencia. |

C. Inversor PHC de 5 Niveles

El modelo diseñado en Simulink se muestra en la Figura 2. Observe que la topología seleccionada es de 2 puentes H en cascada, cada uno con su capacitor el cual se requiere mantener constante en el bus de CD. El inversor multinivel es conectado a la red eléctrica a través de un inductor. Esta topología proporciona una señal sintetizada de 5 niveles de tensión a la salida del convertidor. Cada puente H tiene la capacidad de aportar 3 niveles de tensión: $+V_{dc}$, 0 y $-V_{dc}$. Al tener una conexión de 2 puentes H en cascada el número de niveles se suma para obtener un total de 5 niveles diferentes pues el nivel de voltaje 0 es repetido. Así, los 5 niveles que se obtienen a la salida del inversor PHC son: $+2V_{dc}$, $+V_{dc}$, 0, $-V_{dc}$ y $-2V_{dc}$.

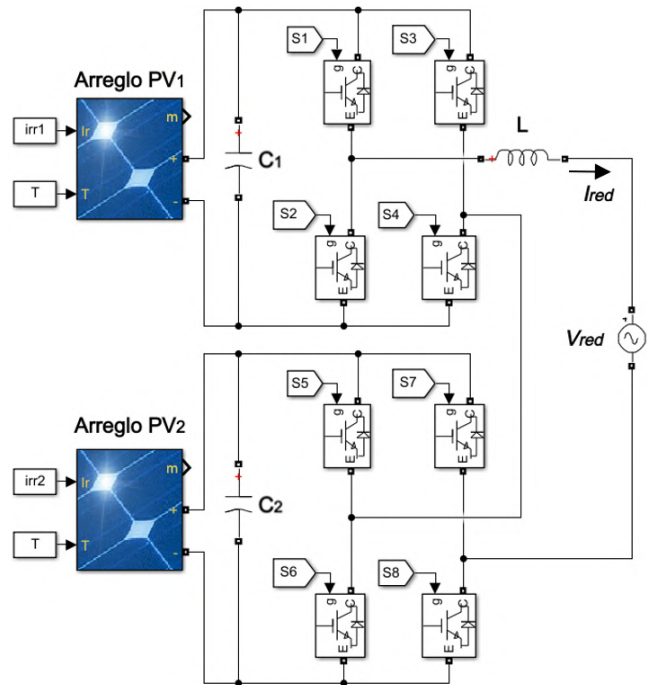


Figura 2. Topología del inversor PHC monofásico de 5 niveles.

Los valores de los componentes y parámetros del modelo simulado se muestran en la Tabla IV.

TABLA IV. PARÁMETROS DEL MODELO

| COMPONENTE | VALOR | UNIDADES |
|--|-------|----------|
| Capacitores C_1 y C_2 | 4.7 | mF |
| Inductor L | 4 | mH |
| Frecuencia de conmutación del inversor PHC | 4 | kHz |
| Frecuencia de cada portadora | 1 | |
| Voltaje de la red eléctrica | 240 | V |
| Frecuencia de la red eléctrica | 60 | Hz |

D. Control de voltaje y conexión a la red eléctrica

La Figura 3 muestra el diagrama a bloques de la estrategia utilizada para controlar el voltaje total en el bus de CD, el cual incluye la sincronización con la red eléctrica. Para llevar a cabo este control se generan el par de voltajes de referencia V_{cdref1} y V_{cdref2} proporcionados por el MPPT, a los cuales se les suma un voltaje inicial para aproximarse rápidamente al valor total del voltaje $V_{arreglo}$ de cada arreglo fotovoltaico. Posteriormente, se compara cada uno de ellos con su respectivo voltaje V_{cd1} y V_{cd2} medido en el capacitor de cada puente y filtrado a través de un filtro pasa bajas (FPB). Cada una de las señales resultantes de la comparación de voltajes se envía a un controlador proporcional integral (PI), y después se suman sus salidas. El bloque PLL permite obtener una señal de referencia a partir del voltaje de la red con el objetivo de sincronizar la integración de la energía. Observe que la señal proveniente de la suma de los voltajes de PI₁ y PI₂ se multiplica con la señal de corriente de referencia I_{ref} proveniente del PLL y la señal resultante es comparada con la corriente medida I_{red} de la red eléctrica. De este modo se obtiene la señal de referencia $Sgnl_ref$ que será utilizada como señal moduladora para así generar los pulsos PWM pues ya se ha considerado el algoritmo MPPT para cada arreglo fotovoltaico. Es importante hacer notar que el lazo interno controla la corriente de la red eléctrica, mientras que el lazo externo regula el voltaje.

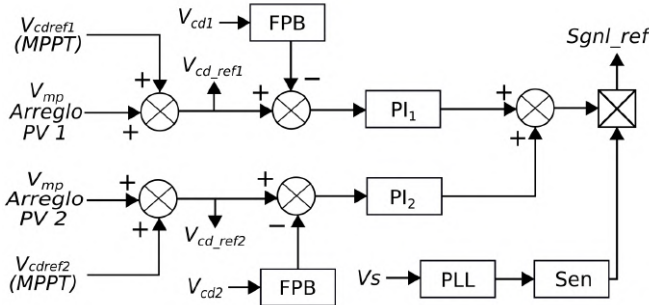


Figura 3. Diagrama de bloques de la estrategia de control de voltaje.

E. Modulación PWM y Control de Balanceo

Existen diferentes técnicas de modulación de ancho de pulso (PWM - pulse width modulation) para los inversores multinivel [14]. Dos de las más utilizadas son la de desplazamiento en fase (PS-PWM) y de desplazamiento en nivel (LS-PWM) [15]. Para corregir el desbalance en los buses de CD de la topología PHC se han propuesto diferentes técnicas basadas en realizar pequeñas modificaciones en la estrategia PWM del convertidor [16]. La PS-PWM consiste en generar un conjunto de señales triangulares como portadoras en base al número de niveles deseados menos uno.

En la Figura 4 se representa la modulación PS-PWM para obtener los pulsos de un inversor PHC de 5 niveles, la cual utiliza 4 portadoras con un defasamiento de 90° entre ellas

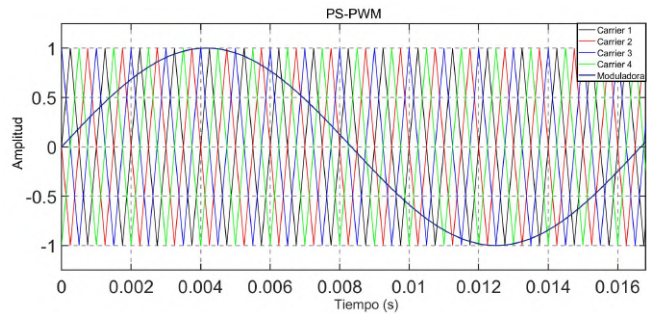


Figura 4. Modulación PS-PWM para un inversor PHC de 5 niveles.

Para corregir el desbalance en los buses de CD de los puentes H conectados en cascada se propone la estrategia mostrada en la Figura 5.

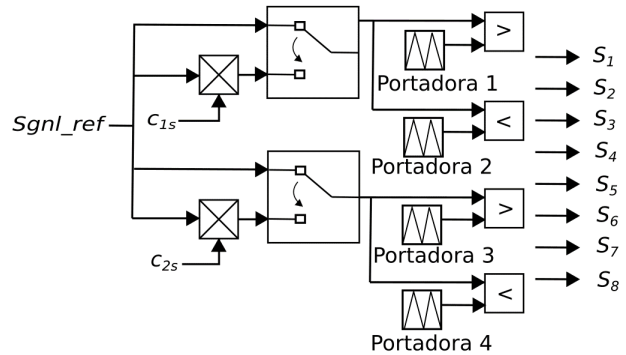


Figura 5. Selección de señal de referencia y modulación PWM.

[15], [16]. La señal de referencia pasa por un método de selección que determina según el desbalance en el convertidor si se debe considerar la señal de referencia original o debe ser modificada para lograr el balanceo de los voltajes. El interruptor de selección de la señal de referencia se acciona considerando como condición una comparación entre el voltaje del capacitor $V_{cd,n}$ y el voltaje de referencia en cada puente $V_{cd_ref,n}$.

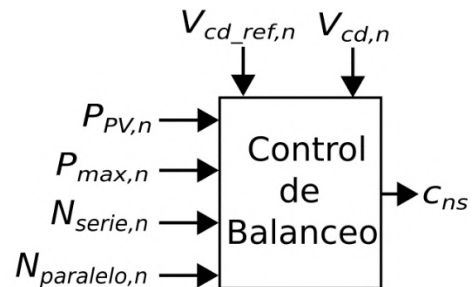


Figura 6. Control de balanceo.

Cuando se presenta el desbalance en el inversor, la señal de referencia original se mantendrá igual o se multiplicará con una variable C_{ns} generada por el control de balanceo mostrado en la Figura 6. Este control se realiza para cada bus

de CD. Para esto primero se obtiene una variable C_n a partir de la potencia $P_{PV,n}$ generada por el arreglo fotovoltaico y de la potencia máxima $P_{max,n}$ que puede obtenerse del arreglo, para así detectar los cambios de irradiancia a través de voltaje, corriente y potencia. Posteriormente se comparan los voltajes y se ingresan a un condicional "si (if)" que considera 3 casos. Finalmente, se multiplica por una variable K_n y a la salida se genera una nueva variable C_{ns} .

La Tabla V se muestran los condicionales y las acciones que rigen el algoritmo de control de balanceo.

TABLA V. CRITERIOS DE CONTROL DE BALANCEO

| CONDICIÓN | ACCIÓN |
|-----------------------------|----------------------------|
| $V_{cd_{ref},n} > V_{cd,n}$ | $C_{ns} = C_n - C_n * K_n$ |
| $V_{cd_{ref},n} = V_{cd,n}$ | $C_{ns} = C_n$ |
| $V_{cd_{ref},n} < V_{cd,n}$ | $C_{ns} = C_n + C_n * K_n$ |

III. RESULTADOS

Los resultados de simulación presentados en esta sección se han obtenido con el programa de MATLAB/SIMULINK.

La Figura 7 se muestra los voltajes de los buses de CD obtenidos en función de las diferentes variaciones de irradiancia en los dos arreglos fotovoltaicos.

La Tabla VI resume el comportamiento de estas variaciones de irradiancia para cada instante de tiempo.

TABLA VI. VARIACIONES DE IRRADIANCIA EN LOS ARREGLOS FOTOVOLTAICOS

| INSTANTE [s] | TIPO | IRRADIANCIAS [W/m ²] | |
|--------------|----------------------------|----------------------------------|-----------|
| | | ARREGLO 1 | ARREGLO 2 |
| 0.5 – 1.2 | Constante | 800 | 1000 |
| 1.2 – 2 | Rampa lineal | 800-1000 | 1000-900 |
| 2 – 3 | Constante | 1000 | 900 |
| 3 – 4 | Constante/ Rampa lineal | 1000 | 900-1000 |
| 4 – 4.5 | Constante | 1000 | 1000 |

En los voltajes de referencia y los voltajes de los buses es posible observar que el voltaje del capacitor 1 ($V_{cd1}=277.5\pm 5.25$ V) sigue el voltaje de referencia 1 ($V_{cd_{ref}1}=277.5$ V), mientras que el voltaje del capacitor 2 ($V_{cd2}=216.5\pm 5$ V) también sigue apropiadamente al voltaje de referencia 2 ($V_{cd_{ref}2}=216.5$ V). Por lo tanto, ambos voltajes se mantienen correctamente balanceados.

La Figura 8 muestra que el voltaje a la salida del inversor PHC efectivamente es de 5 niveles. Note que también se ha graficado el valor promedio contenido dentro de la señal multinivel.

En la Figura 9 se presentan la potencia de la red eléctrica, la potencia real producida por los arreglos fotovoltaicos y su potencia teórica generada.

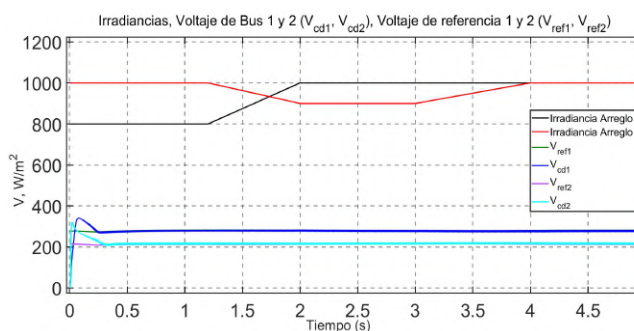


Figura 7. Irradiancias y voltajes en los buses de CD de cada puente H.

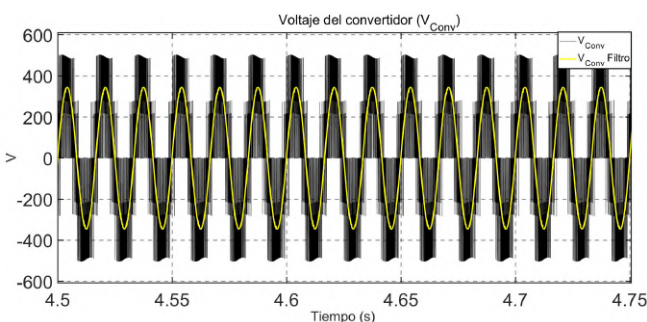


Figura 8. Voltaje del inversor PHC de 5 niveles.

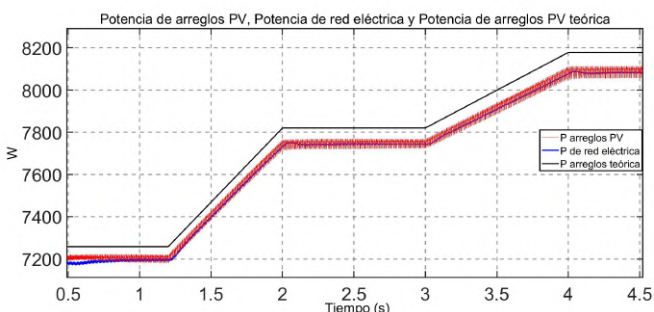


Figura 9. Potencias: a) P_{red} de la red eléctrica, b) P_{PV} real producida por los arreglos fotovoltaicos, c) $P_{PV_{teo}}$ teórica generada.

La Tabla VII resume los resultados de las potencias obtenidas para ambos arreglos fotovoltaicos en instantes cuando la irradiancia es constante.

La Figura 10 muestra la señal de voltaje $V_{red}=240$ V y las corrientes $I_{red}=43$ A, 45.85 A y 47.9 A de la red eléctrica en base a los instantes de tiempo e irradiancias de la Tabla VI. Es posible apreciar que a pesar de la asimetría en los arreglos fotovoltaicos y de las irradiancias diferentes, las señales resultantes de voltaje y corriente son senoidales con una muy baja distorsión. Observe que estas señales están fuera de fase, lo que significa que la red eléctrica está recibiendo la energía generada por los arreglos fotovoltaicos.

En la Figura 11 se muestra el espectro armónico y la tasa de distorsión armónica (THD - *total harmonic distortion*) para la corriente integrada a la red. Es notable como aún bajo condiciones de asimetría, el algoritmo de balanceo propuesto permite obtener un THD de tan solo 1.43%.

TABLA VII. POTENCIAS DE AMBOS ARREGLOS FOTOVOLTAICOS EN INSTANTES DE IRRADIANCIA CONSTANTE

| INSTANTE [s] | P_{red} [W] | P_{pv} [W] | P_{pvteo} [W] |
|--------------|---------------|--------------|-----------------|
| 1 – 1.2 | 7195 | 7210 | 7258 |
| 2 – 3 | 7743 | 7745 | 7820.2 |
| 4 – 4.5 | 8084 | 8100 | 8178 |

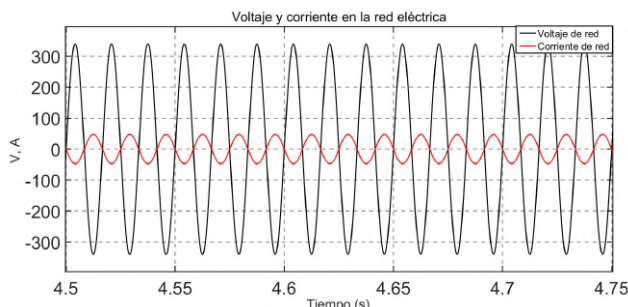


Figura 10. Voltaje y corriente de la red eléctrica.

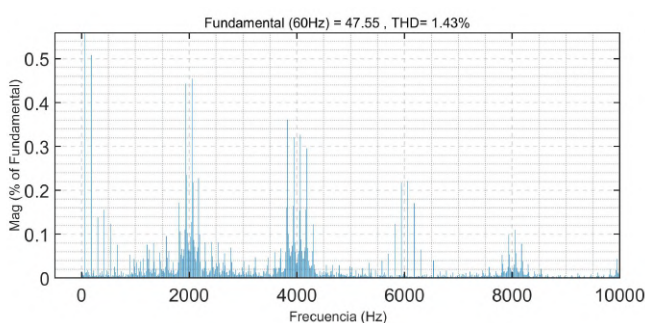


Figura 11. Espectro armónico y THD de la corriente de la red eléctrica.

IV. CONCLUSIONES

Este trabajo presentó la integración de energía fotovoltaica a la red eléctrica mediante un inversor PHC monofásico de 5 niveles funcionando en condiciones de asimetría. El fenómeno de desbalance en la distribución de potencia se corrigió satisfactoriamente aplicando la estrategia propuesta de control de balanceo basada en la modificación de la técnica de modulación PS-PWM de 5 niveles para cada puente H. En los resultados de simulación se observó que la potencia en la red, así como potencia real de los arreglos PV se aproximaron con alta precisión a su potencia teórica. El voltaje y la corriente de la red se lograron mantener con una buena calidad senoidal, obteniendo un THD para la corriente de tan solo 1.43%. La estrategia de balanceo propuesta tiene un gran potencial para integrar a la red la energía fotovoltaica de arreglos asimétricos mediante un solo inversor.

V. AGRADECIMIENTOS

L. F. Díaz Díaz agradece al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología por el apoyo económico otorgado en el marco del "Programa de Becas Nacionales para Estudios de Posgrado" con número de solicitud 2020-000026-02NACF-17672.

Los autores también agradecen al TNM y al Instituto

Tecnológico de La Laguna por el apoyo económico recibido para el desarrollo del presente trabajo de investigación.

VI. REFERENCIAS

- [1] Xiao, W.; El Moursi, M. S.; Khan, O. y Infield, D. (2016) "Review of grid-tied converter topologies used in photovoltaic systems", *IET Renewable Power Generation*, vol. 10, no. 10, pp. 1543-1551, DOI: 10.1049/iet-rpg.2015.0521.
- [2] Golestan S.; Guerrero, J. M. y Vasquez J. C. (2017) "Three-Phase PLLs: A Review of Recent Advances", *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 32, no. 3, pp. 1894-1907, DOI: 10.1109/TPEL.2016.2565642.
- [3] Sahu, P.; Verma, D. y Nema, S. (2016) "Physical Design and Modelling of Boost Converter for Maximum Power Point Tracking in Solar PV systems", *International Conference on Electrical Power and Energy Systems (ICEPES)*, pp. 10-15, DOI: 10.1109/ICEPES.2016.7915898
- [4] Subudhi, B. y Pradhan, R. (2013) "A Comparative Study on Maximum Power Point Tracking Techniques for Photovoltaic Power Systems", *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, vol. 4, no. 1, pp. 89-98, DOI: 10.1109/TSTE.2012.2202294.
- [5] Villanueva, E.; Correa, P.; Rodríguez, J. y Pacas M. (2009) "Control of a Single-Phase Cascaded H-Bridge Multilevel Inverter for Grid-Connected Photovoltaic Systems", *IEEE Trans. Ind. Elec.*, vol. 56, no. 11, pp. 4399-4406, DOI: 10.1109/TIE.2009.2029579
- [6] Vahedi H.; Sharifzadeh, M. y Al-Haddad, K. (2018) "Modified Seven-Level Pack U-Cell Inverter for Photovoltaic Applications", *IEEE J. Emerg. Sel. Top. Power Electron.*, vol. 6, no. 3, pp. 1508- 1516, DOI: 10.1109/JESTPE.2018.2821663.
- [7] Guo, X.; Yang, Y. y Zhu, T. (2018) "ESI: A Novel Three-Phase Inverter With Leakage Current Attenuation for Transformerless PV Systems", *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 65, no. 4, pp. 2967-2974, DOI: 10.1109/TIE.2017.2757916.
- [8] Rahimi, R.; Farhangi, S.; Farhangi, B.; Moradi, G. R.; Afshari E. y Blaabjerg, F. (2018) "H8 Inverter to Reduce Leakage Current in Transformerless Three-Phase Grid-Connected Photovoltaic systems", *IEEE J. Emerg. Sel. Top. Power Electron.*, vol. 6, no. 2, pp. 910-918, DOI: 10.1109/JESTPE.2017.2743527.
- [9] Guo, X.; Cavalcanti, M. C.; Farias, A. M. y Guerrero, J. M. (2013) "Single-Carrier Modulation for Neutral-Point Clamped Inverters in Three-Phase Transformerless Photovoltaic Systems", *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 28, no. 6, pp. 2635-2637, DOI: 10.1109/TPEL.2012.2224138.
- [10] Patrao Herrero, I. (2015) "Concepción e Integración en Microrredes Residenciales de Inversores Multinivel Sin Transformador de Aislamiento con Extracción Simultánea de la Máxima Potencia de Múltiples Generadores Fotovoltaicos", *Tesis Doctoral*, Departamento de Ingeniería Electrónica, UPV, Valencia.
- [11] Marzoughi, A.; Burgos, R.; Boroyevich, D. y Xue, Y. (2015) "Design and Comparison of Cascaded H-bridge, Modular Multilevel Converter and 5-L Active Neutral Point Clamped Topologies for Drive Application", *IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)*, pp. 4033-4039, DOI: 10.1109/ECCE.2015.7310229.
- [12] Alonso, O.; Sanchis, P.; Gubia, E. y Marroyo, L. (2003) "Cascaded H-Bridge Multilevel Converter for Grid Connected Photovoltaic Generators with Independent Maximum Power Point Tracking of each Solar Array", *IEEE 34th Annual Conference on Power Electronics Specialist*, pp 731-735, DOI: 10.1109/PESC.2003.1218146.
- [13] Algarny, K. S.; Vilathgamuwa, M.; Broadmeadow, M. y Choi, W. (2020) "Independent Voltage Oriented DC-Side Sensorless Control of Three-Phase Cascaded H-bridge Multilevel Inverter With Decentralized MPPTs", *IEEE 29th International Symposium on Industrial Electronics (ISIE)*, pp. 740-743, DOI: 10.1109/ISIE45063.2020.9152267.
- [14] Freddy, T. K. S.; Rahim, N. A.; Hew W. y Che, H. S. (2015) "Modulation Techniques to Reduce Leakage Current in Three-Phase Transformerless H7 Photovoltaic Inverter", *IEEE Transactions on*

Industrial Electronics, vol. 62, no. 1, pp. 322-331, DOI: 10.1109/TIE.2014.2327585.

- [15] Shi, X.; Wang, Z.; Tolbert, L. M. y Wang, F. (2013) "A Comparison of Phase Disposition and Phase Shift PWM Strategies for Modular Multilevel Converters", *IEEE Energy Conversion Congress and Exposition, ECCE.*, pp. 4090-4096, DOI: 10.1109/ECCE.2013.6647244.
- [16] Chavarría, J.; Biel, D.; Guinjoan F.; Meza, C. y Negroni, J. J. (2013) "Energy-Balance Control of PV Cascaded Multilevel Grid-Connected Inverters Under Level-Shifted and Phase-Shifted PWMs", *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 60, no. 1, pp. 98-111, DOI: 10.1109/TIE.2012.2186108.



Arjona López, Marco Antonio Marco recibió el grado de Ingeniería Eléctrica del Instituto Tecnológico de Durango, México en 1988, el grado de Maestría en Ciencias en Ingeniería Eléctrica en 1990 y el grado de Doctor en Filosofía en Ingeniería Eléctrica del Imperial College, Londres, Inglaterra en 1996. Laboró con el Departamento de Simulación del Instituto de Investigaciones Eléctricas desde 1991 hasta 1999. Actualmente es Profesor de Máquinas Eléctricas en el Instituto Tecnológico de la Laguna. Sus intereses son el diseño, análisis y control de máquinas eléctricas y energías renovables.

VII. BIOGRAFÍA



Díaz Díaz, Luis Fernando, Nació el 21 de junio de 1998 en Torreón, Coahuila. Cursó la licenciatura en Ingeniería Electrónica en el Instituto Tecnológico de La Laguna, Torreón, Coahuila, México, en 2020.

El Ing. Luis Díaz actualmente está cursando la Maestría en Ciencias en Ingeniería Eléctrica dentro de la línea de investigación de Potencia y Energías Renovables en el Instituto Tecnológico de La Laguna en Torreón, Coahuila, México. Sus

intereses de investigación son la electrónica de potencia y la energía fotovoltaica.



Lara Cardoso, Jorge obtuvo el grado de Doctor en Ingeniería Eléctrica de la Université du Québec-École de Technologie Supérieure (ÉTS), Montreal, Canadá, en 2017. Actualmente es profesor investigador en la División de Estudios de Posgrado e Investigación del Instituto Tecnológico de la Laguna (ITL), Torreón, Coahuila, México.

El Dr. Lara es miembro del Sistema Nacional de Investigadores (SNI) de México teniendo la distinción de Investigador Nacional Nivel I. También es revisor activo de las revistas *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, *IEEE Transactions on Power Electronics*, *IEEE Transactions on Energy Conversion*, *IEEE Access* e *IET Electric Power Applications*.

Sus intereses de investigación incluyen electrónica de potencia, energías renovables eólica y fotovoltaica, calidad de la energía, filtrado activo, máquinas eléctricas y drives, vehículos eléctricos y control en tiempo real basado en DSP.



Hernández Flores, Concepción recibió el grado de Ingeniería Sistemas Computacionales del Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey, Campus Morelos en 1990, el grado de Maestría en Ciencias en Fundamentos de Tecnología de la Información Avanzada en el Imperial College, de Londres, Inglaterra en 1995, y el grado de Doctor en Ciencias en Ingeniería Eléctrica del Instituto Tecnológico de la Laguna en Torreón, México, en 2007. Laboró con el

Departamento de Simulación del Instituto de Investigaciones Eléctricas desde 1991 hasta el 2000. Actualmente labora en el Instituto Tecnológico de la Laguna, en Torreón, México. Sus áreas de interés son inteligencia artificial, optimización, máquinas eléctricas y energías renovables.