CONTROL DE INVERSORES MULTINIVEL TIPO NPC EN SISTEMAS FOTOVOLTAICOS CONECTADOS A LA RED

CONTROL OF NPC MULTILEVEL INVERTERS FOR GRID-TIED PHOTOVOLTAIC SYSTEMS

MSc. Fausto Osorio, Dra. María Alejandra Mantilla, MSc. Jaime Guillermo Barrero, Dr. Johann Farith Petit

Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones
Universidad Industrial de Santander

Abstract: This paper presents the operation of grid-tied photovoltaic systems in a two stages configuration. A Boost DC/DC Converter and a multilevel Neutral Point Clamped Inverter are used to connect the photovoltaic generator with the grid. The control algorithms are focused in both: the balancing of the DC-side capacitors voltages in the multilevel inverter by the selection of the proper space vector in a modulation technique and the injection of active power to the grid. The system performance is evaluated by simulations in PSIM® for different irradiance conditions.

Keywords: Grid-tied photovoltaic systems, Neutral Point Clamped Converters, Multilevel Inverters, Space Vector Modulation, DC link capacitor voltage control.

Resumen: Este artículo presenta la operación de sistemas fotovoltaicos conectados a la red considerando la configuración de dos etapas. Un convertidor DC/DC elevador y un inversor multinivel en topología de diodos anclados al neutro son los convertidores de las dos etapas de potencia que interconectan la red de distribución con el arreglo fotovoltaico. Los algoritmos de control del sistema fotovoltaico se enfocan en el balance de tensión en los condensadores del inversor multinivel mediante le selección del vector espacial apropiado en la técnica de modulación y en la potencia activa inyectada a la red. El comportamiento del sistema es evaluado por medio de simulaciones en PSIM® bajo diferentes niveles de irradiancia.

Palabras clave: Sistemas fotovoltaicos conectados a la red, Convertidores tipo diodos anclados al neutro, Inversores multinivel, Modulación por vector de estados, Control de la tensión de los condensadores del bus de continua.

1. INTRODUCIÓN

El incremento en la demanda de energía eléctrica en conjunto con los altos niveles de emisión de combustibles fósiles, han llevado a los investigadores a desarrollar sistemas de generación a base de energías renovables. En este desarrollo, son tres las fuentes que han llamado más la atención, no solo por considerarse limpias, sino por su naturaleza renovable. Éstas son la eólica, la fotovoltaica, y las celdas de combustible (Delesposte, Mello, & Lyrio, 2011), siendo la fotovoltaica la que capta mayor atención por la disponibilidad de la fuente (Deshpande & Bhasme, 2017).

Los sistemas fotovoltaicos conectados a la red aprovechan mejor la energía disponible que los aislados, entregando el excedente de energía al sistema de distribución y de esta manera, disminuir costos, ya que no es necesario ningún elemento que almacene la energía.

En la Figura 1 se muestra un diagrama esquemático de un sistema fotovoltaico conectado a la red.

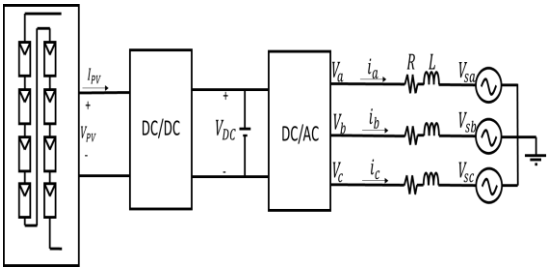


Figura 1. Sistema fotovoltaico conectado a la red.

En este sistema de dos etapas, llamado así por presentar dos convertidores de potencia, se emplea un convertidor DC/DC y un inversor de potencia.

Una de las topologías de inversor que puede ser utilizada para la conexión de sistemas fotovoltaicos a la red es el convertidor multinivel de diodos anclados al neutro (NPC, *Neutral Point Clamped*). La utilidad de esta topología se evidencia en grandes sistemas tipo multistring o centralizados, ofreciendo mejores resultados en la calidad de las señales de salida respecto a los inversores tradicionales (Rodriguez, *et al*., 2009).

Entre los principales problemas de los inversores tipo NPC está la posible ocurrencia de desbalances en las tensiones de los condensadores del lado de continua, lo que puede resultar en asimetrías en las señales de salida y la pérdida de controlabilidad del inversor. Para esto, el control del inversor debe mantener un balance en las tensiones de estos condensadores. Entre las propuestas que se enfocan en contrarrestar este problema se destacan estrategias basadas en la modificación de las señales portadoras en la estrategia de modulación del inversor mediante técnicas que incluyen: adición de niveles de continua, inclusión de coeficientes de escala para modificar la pendiente (Swamy, Anuradha, & Ganesh, 2015) o modificación de la moduladora mediante un algoritmo de decisión (Cai, B. *et al*., 2011).

Partiendo de lo anterior, este trabajo muestra resultados de simulación de una estrategia de control enfocada en el balance de tensión en los condensadores de entrada de un inversor NPC de tres niveles considerando la estrategia de modulación vectorial, mediante la selección de los vectores redundantes adecuados para cumplir este propósito. Se presentan resultados de simulación de un sistema fotovoltaico trifásico conectado a la red controlado para seguir el punto de máxima potencia del generador, balancear las tensiones del lado de continua del inversor y la inyección de potencia activa a la red. Los resultados muestran el correcto funcionamiento del sistema consiguiendo los objetivos de control.

2. MODELO DEL SISTEMA

En la Figura 2 se ilustra el sistema interconectado con las configuraciones de los convertidores de potencia consideradas en este trabajo. Los principales componentes se describen a continuación:

- El generador fotovoltaico está compuesto por un arreglo en serie de 8 paneles solares de 250 W cada uno, obteniendo una capacidad total de 2000 W.
- El convertidor DC/DC es modelado por la configuración elevadora (*Boost Converter*)
- El convertidor DC/AC corresponde a la configuración de inversor multinivel de tres niveles de diodos anclados al neutro (*Neutral Point Clamped - NPC*).
- La red de distribución es tomada como un sistema trifásico equilibrado de baja tensión.
- La conexión del inversor y la red se hace a través de un filtro RL.

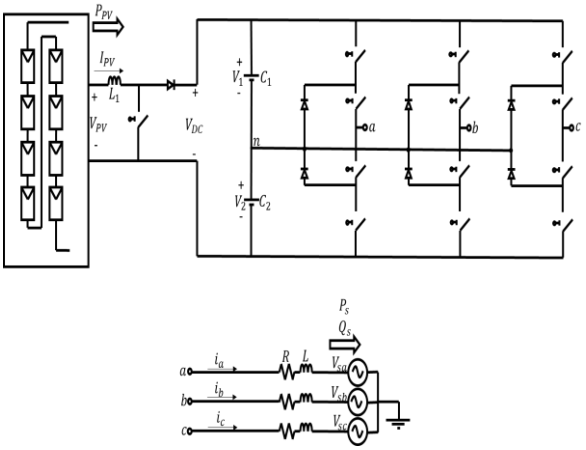


Figura 2. Sistema fotovoltaico conectado a la red de dos etapas.

3. CONTROL DEL SISTEMA

La controlabilidad del sistema ilustrado en la Figura 2 se centra en la generación de los pulsos de disparo de los convertidores de potencia, buscando que el control garantice la extracción de la máxima potencia de los paneles solares, la inyección a la red de la potencia activa generada por el arreglo de paneles solares y que el bus de DC del inversor se mantenga en el nivel de referencia que permita el correcto funcionamiento del convertidor DC/AC.

A. Seguidor del punto de máxima potencia MPPT (*Maximun Power Point Tracker*)

Es necesario operar el sistema fotovoltaico en el punto de máxima potencia y así aprovechar toda la potencia disponible y, para llevar a cabo tal tarea, se dispuso de la técnica de perturbar y observar clásica (P&O), la cual consiste en interrumpir el ciclo de trabajo del convertidor DC/DC y tomar la decisión de incrementar o disminuir dicho ciclo y así llevar al sistema a entregar la máxima potencia. El algoritmo de P&O se ilustra en la Figura 3, donde la variable *d* corresponde al ciclo de trabaja del convertidor DC/DC elevador.

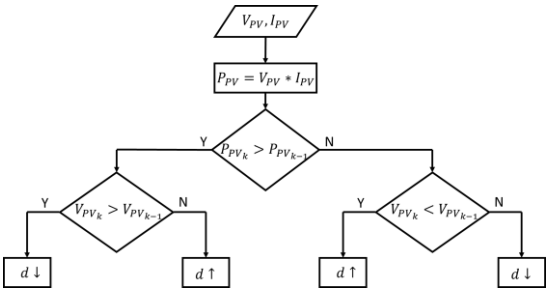


Figura 3. Algoritmo P&O

B. Control del convertidor DC/AC

El inversor es controlado mediante un lazo cerrado en el marco de referencia estacionario. Este control requiere la transformación de las señales de tensión al marco αβ mediante la siguiente ecuación:

$$\begin{bmatrix} V_{s\alpha} \\ V_{s\beta} \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} V_{sa} \\ V_{sb} \\ V_{sc} \end{bmatrix} \quad (1)$$

Las corrientes son también transformadas utilizando la ecuación *(1)* y una vez se dispongan de las señales de tensión y corriente en el marco estacionario, se implementa el lazo de control de la Figura 4 (Yazdani & Iravani, 2010).

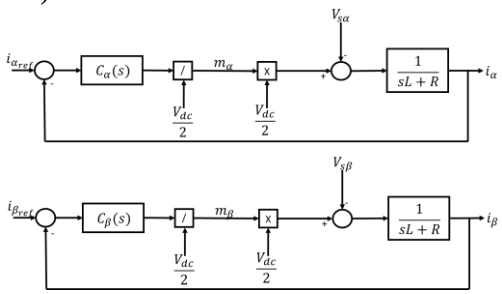


Figura 4. Lazo de control de corriente.

Los controladores $C_\alpha(s)$ y $C_\beta(s)$ deben seguir una referencia sinusoidal, ya que en el marco estacionario, las señales son sinusoides de la misma frecuencia que la red, para lo cual, se ha seleccionado un controlador proporcional resonante, ver ecuación (2), basado en el "Internal Model Principle" (Nahum Zmood & Grahame Holmes, 2003).

$$C_\alpha(s) = C_\beta(s) = K_p + \frac{2K_i s}{s^2 + \omega_0^2} \quad (2)$$

C. Modulación Vectorial

El inversor NPC de tres niveles presenta en cada rama cuatro transistores los cuales son activados en parejas dando como resultado tres posibles estados de conmutación. El estado "-", el cual activa los dos transistores de la parte inferior, el estado "0", el cual activa los dos transistores del medio y, el estado "+", activa los dos transistores de la parte superior. El diagrama de estados para el NPC trifásico de tres niveles se muestra en la Figura 5 (Celanovic & Boroyevich, 2001).

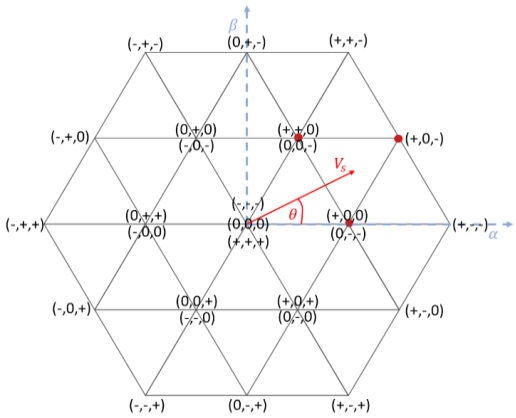


Figura 5. Vectores de estado del inversor NPC.

En la Figura 5 también se encuentra el vector de referencia que es modulado por el inversor. Este vector, debe quedar plasmado al interior del hexágono de los vectores de estado, ya que, si se sale de dicha área, el inversor no podrá generar las señales requeridas y se perderá la controlabilidad del sistema.

D. Balance de tensión en los condensadores del inversor.

La configuración NPC presenta un desbalance natural en la tensión de los condensadores de entrada, desbalance que debe ser tratado para la controlabilidad del sistema. Para este propósito, mediante la modulación vectorial, se seleccionan los vectores que ayuden a mitigar el efecto de desbalance de tensión.

E. Control del bus de DC

Además del control de tensión de cada uno de los condensadores de entrada del inversor, se debe garantizar un nivel de tensión del bus de DC de entrada. Este control se realiza mediante un lazo externo, el cual realiza la operación de control a través del inversor, razón por la cual, este control es más lento que el control de corriente del inversor. En la Figura 6 se muestra el esquema de control (Teodorescu, Liserre, & Rodríguez, 2011).

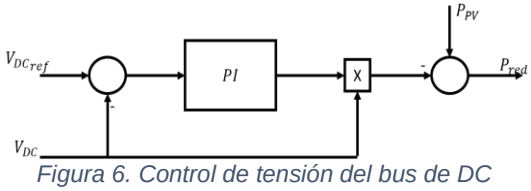


Figura 6. Control de tensión del bus de DC

F. Corrientes de referencia

Las corrientes de referencia que el controlador proporcional resonante deben seguir son obtenidas con la potencia disponible a entregar a la red y las tensiones de la red en el marco de referencia estacionario (Teodorescu, Liserre, & Rodríguez, 2011), esto es:

$$i_{\alpha ref} = \left(\frac{V_{s\alpha}}{V_{s\alpha}^2 + V_{s\beta}^2}\right) P_{red} + \left(\frac{V_{s\beta}}{V_{s\alpha}^2 + V_{s\beta}^2}\right) Q_{red} \quad (3)$$

$$i_{\beta ref} = \left(\frac{V_{s\alpha}}{V_{s\alpha}^2 + V_{s\beta}^2}\right) P_{red} + \left(\frac{V_{s\beta}}{V_{s\alpha}^2 + V_{s\beta}^2}\right) Q_{red} \quad (4)$$

4. PARÁMETROS DE SIMULACIÓN

En la tabla 1 se resumen los parámetros de entrada del sistema. Las estradas al sistema son la irradiancia, la temperatura de los paneles solares y el sistema de distribución trifásico balanceado de baja tensión. La temperatura se mantuvo constante con un valor de 25°C y la irradiancia se tomó como cambios abruptos tipo escalón, simulando cambios en las condiciones climáticas y así observar el funcionamiento del sistema ante estas variaciones.

Tabla 1. Parámetros de entrada

PARÁMETRO	*SÍMBOLO*	*VALOR*
Temperatura	*T*	*25°C*
Irradiancia	*S*	*1000, 500, 300 y 800 W/m²*
Red trifásica	V_{sa}, V_{sb} y V_{sc}	*110* V_{rms}

En la tabla 2 se listan los parámetros del sistema

Tabla 2. Parámetros del sistema

PARÁMETRO	*VALOR*
L_1	*16 mH*
C_1=C_2	*2200 µF*
L	*30 mH*
R	*0.1 Ω*

En la Figura 7 se observa el diagrama de bloques del sistema.

5. RESULTADOS

En la Figura 8 se observan las tensiones de los condensadores C_1 y C_2. La acción del algoritmo de control sobre el balance de tensión de los condensadores se mantiene aún ante un cambio de irradiancia, requisito indispensable en la configuración NPC.

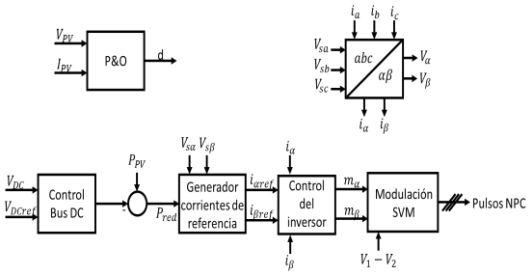


Figura 7. Diagrama de bloques sistema de control

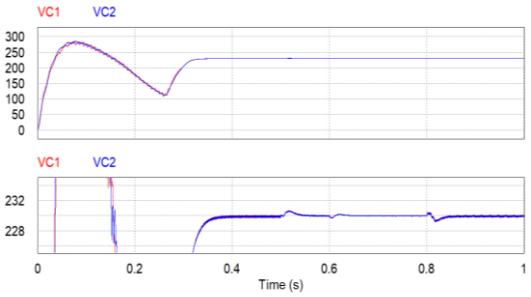


Figura 8. Tensión en los condensadores de entrada del inversor

En la Figura 9 se ilustran la tensión de la red para la fase a y la corriente de línea de la misma fase, observándose que la corriente y la tensión están en fase, indicando la inyección de potencia activa a la red con un factor de potencia unitario. La magnitud de la tensión ha sido escalada por un factor de 15 con el fin de una mejor visualización. Los cambios en la amplitud de la corriente se deben a la potencia disponible a inyectar a la red por los cambios en la irradiancia del sistema.

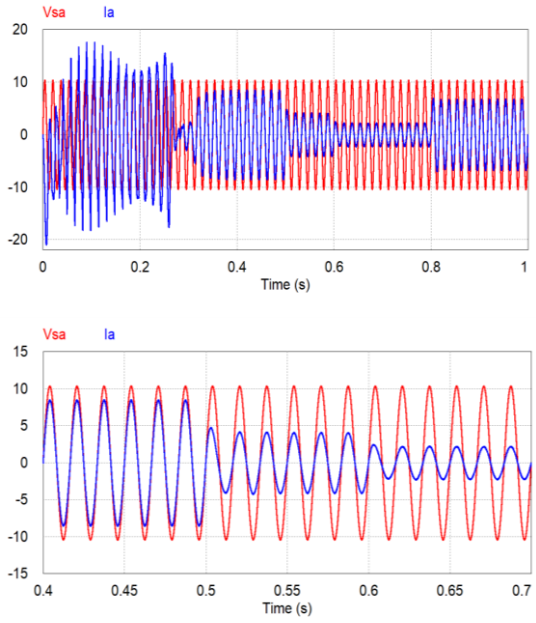


Figura 9. Tensión y corriente de la fase a

CONCLUSIONES

Se ha implementado un sistema fotovoltaico conectado a la red a base de la topología de inversor multinivel tipo NPC, considerando los controladores necesarios para el correcto funcionamiento con el fin de inyectar la potencia activa generada a la red de suministro, seguir el punto de máxima potencia del generador y garantizar el balance en las tensiones de los condensadores del lado de continua del inversor.

Según los resultados de simulación, la controlabilidad del sistema no se ve afectada ante cambios abruptos en la irradiancia y además se logran los objetivos de control. Asimismo, las tensiones en los condensadores del lado de continua del inversor muestran un sobreimpulso que debe ser tenido en cuenta al momento de seleccionar los condensadores.

REFERENCIAS

Cai, B. *et al*. (2011). Novel Control Strategies for Voltage Balance of DC Capacitors in NPC Three-level Inverter. *International Conference on Electrical Machines and Systems, Beijing.*

Celanovic, N., & Boroyevich, D. (2001). A Fast Space-Vector Modulation Algorithm for Multilevel Three-Phase Converters. *IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRY APPLICATIONS, 37*(2), 637-641.

Delesposte, H., Mello, P., & Lyrio, D. (2011). A review of the main inverter topologies applied on the integration of renewable energy resources to the grid. *IEEE*, 963-969.

Deshpande, S., & Bhasme, N. R. (2017). A Review of Topologies of Inverter for Grid Connected PV Systems. *International Conference on Innovations in Power and Advanced Computing Technologies.*

Nahum Zmood, D., & Grahame Holmes, D. (2003). Stationary Frame Current Regulation of PWM Inverters With Zero Steady-State Error. *IEEE TRANSACTIONS ON POWER ELECTRONICS, 18*(3), 814-822.

Rodriguez, J. *et al*. (2009). Multilevel Converters: An Enabling Technology for High-Power Applications, *PROCEEDINGS OF THE IEEE, Vol. 97, Nº 11*.

Swamy, M., Anuradha, K. & Ganesh B. (2015). DC Level Stabilization in Neutral Point Clamped Multilevel Inverters. *Conference on Power, Control, Communication and Computational Technologies for Sustainable Growth (PCCCTSG), Kurnool.*

Teodorescu, R., Liserre, M., & Rodríguez, P. (2011). *Grid Converters For Photovoltaic And Wind Power Systems.* New Delhi: Wiley.

Yazdani, A., & Iravani, R. (2010). *Voltage-Sourced Converteres in Power Systems.* New Jersey: Wiley.