

# Análisis de Inversores Monofásicos Multinivel

A. G. Sánchez-Reyna, F. E. López-Monteagudo, J. de la Torre-Ramos

**Resumen**— En el presente artículo se analizan varias topologías de inversores multinivel, interconectados a la RED, se realizaron varias simulaciones para 2 y 3 niveles llegándose a la conclusión que la topología que ofrece mejores resultados para sistemas interconectados es aquella que utiliza puentes H en cascada.

Para el control de los inversores multinivel en aplicaciones de media y alta potencia se implementó la técnica de modulación selectiva de armónicos con la cual se logra reducir significativamente el contenido de armónicos.

**Palabras clave**— Inversores multinivel, control de inversores multinivel, modulación selectiva de armónicos.

## I. INTRODUCCIÓN

Al analizar el estado actual de la utilización de la energía a escala global, existe una gran dependencia de las fuentes tradicionales, con graves impactos ambientales, además el combustible principal en casi la mayoría de las plantas generadoras es el petróleo, provocando una gran contaminación ambiental.

Debido a los problemas de contaminación que existen a nivel global, se ha optado por la utilización de energías alternas o renovables. Mediante el uso de paneles fotovoltaicos (PV) se puede obtener una energía limpia, ya que estos no emiten contaminantes a la atmosfera y a su vez el mantenimiento que necesitan es poco. Para el año 2030 se espera que 13% de la energía eléctrica mundial sea producida por PV [1], por lo que una de las aplicaciones que estos tienen es en la interconexión a red.

Un elemento importante para la interconexión de PV a la red es un inversor, ya que el inversor se encarga de convertir la corriente directa (CD) obtenida de los en PV en corriente alterna (CA), para estos se han estudiado y analizado diferentes topologías de inversores [2], [3]. Dentro de estas topologías se encuentran los inversores multinivel (MLI) que en comparación con los inversores tradicionales de dos niveles, estos pueden ser utilizados en aplicaciones de media y alta tensión, ya que presentan bajas pérdidas de conmutación y por lo tanto son capaces de alcanzar altos voltajes con poca

distorsión armónica.

En los inversores multinivel es necesario utilizar dispositivos semiconductores de potencia, entre los que se encuentran los BJT, MOSFET, FET, GTO, SITCH, MCH e IGBT.

Topologías de Inversores Multinivel.

Para aplicaciones de media y alta tensión es recomendable utilizar inversores multinivel, los cuales pueden alcanzar altos voltajes con poca distorsión armónica, sin el uso de transformadores o de dispositivos de conmutación [4], [5].

Las conmutaciones de los semiconductores de potencia permiten obtener una onda casi senoidal, la cual se forma a partir de varios niveles de voltaje de CD; mientras mayor sea el número de niveles de voltaje a la salida del inversor se obtiene una menor distorsión armónica.

En aplicaciones de media y alta tensión los inversores multinivel presentan una serie de ventajas:

- Bajo contenido de armónicos cuando la cantidad de niveles aumentan, reduciéndose las necesidades de filtrado.
- Presentan un bajo nivel de  $dv/dt$  para los componentes.
- Las corrientes de entrada son de muy baja distorsión armónica.
- Pueden operar con baja frecuencia de conmutación reduciendo las pérdidas por conmutación y mejorando la eficiencia total del inversor.

Existen varias topologías de inversores multinivel, las cuales depende del tipo de acoplamiento que existe entre los diferentes niveles, siendo las más populares:

- A. Inversores Multinivel de Diodo Anclado.
- B. Inversores Multinivel con Capacitor Flotante.
- C. Inversores Multinivel en Cascada con Puentes H.

Para aplicaciones de sistemas fotovoltaicos interconectados a la RED se recomienda utilizar inversores multinivel en cascada con puentes H, [6].

**A. Inversores Multinivel de Diodo Anclado.**

La topología de los inversores multinivel de diodo anclado es la primera que se desarrolló para la conversión de CD en CA con una buena calidad en la potencia [6]-[8], la principal desventaja de los Inversores multinivel de diodo anclado es que para tener más niveles voltaje, se requiere un mayor número de diodos, en la Fig. 1. se muestra su configuración para de 5 niveles.

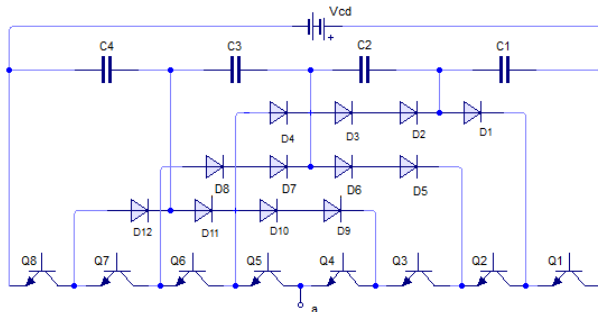


Fig. 1. Inversor multinivel de diodo anclado de 5 niveles.

Los inversores multinivel de diodo anclado ofrecen múltiples niveles de voltaje mediante la conexión de un banco de capacitores en serie. De acuerdo con la invención original [9], el concepto puede extenderse a cualquier número de niveles, aumentando el número de capacitores, ya que requiere (n-1) capacitores en el bus de CD, para producir n niveles de voltaje, [11].

**B. Inversores Multinivel con Capacitor Flotante.**

La topología de los inversores con capacitor flotante es similar a la de los inversores de diodo anclado, ya que implica la conexión en serie de capacitores en lugar de diodos, para poder generar una onda de voltaje de varios niveles, en la Fig. 2 se muestra la configuración para 5 niveles.

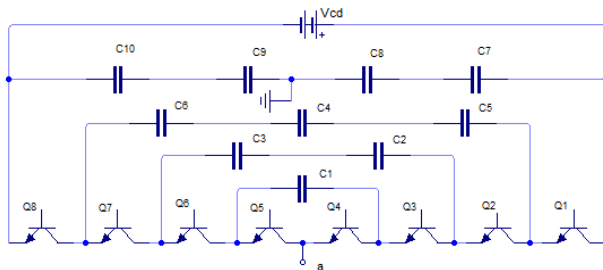


Fig. 2. Inversor multinivel con capacitor flotante de 5 niveles.

Los inversores multinivel con capacitor flotante mientras más niveles de voltaje, mayor será el número de capacitores haciéndose complejo el control del inversor, [11].

**B. Inversores Multinivel en Cascada con Puentes H.**

La topología de inversor multinivel en cascada se basa en la conexión de puentes H. Las tensiones continuas de entrada deben estar aisladas entre ellas. En aplicaciones de energía solar fotovoltaica, la fuente de corriente continua representa los paneles solares. Los inversores multinivel en cascada pueden ser monofásicos o trifásicos, ya que comparten la misma topología simplemente variando en la cantidad de brazos del inversor.

Un inversor multinivel en cascada consiste en conectar puentes H en serie para obtener una onda senoidal a la salida del mismo, la cual se forma a partir de sintetizar un determinado voltaje a partir de varias fuentes de alimentación independientes de CD, que pueden ser baterías, celdas de combustible o PV. [10]

Se realizaron varias simulaciones con el Matlab simulink, en la Fig. 3 se muestra la configuración utilizada para la simulación y en la 4 los resultados de la simulación para 2 niveles.

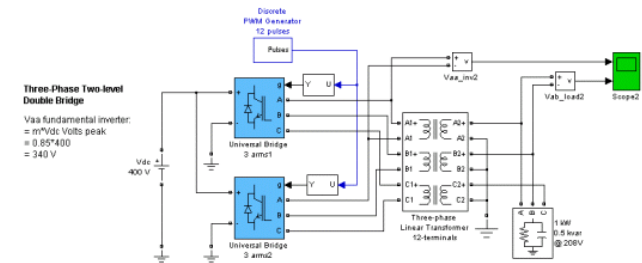


Fig. 3. Inversor monofásico de 2 niveles.

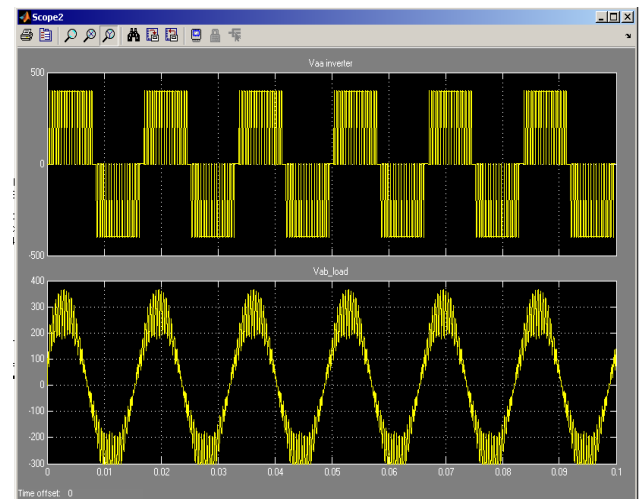


Fig. 4. Voltaje de salida del inversor monofásico de 2 niveles.

En la Fig. 5 se muestra la configuración utilizada y en la 6 los resultados de la simulación para 3 niveles.

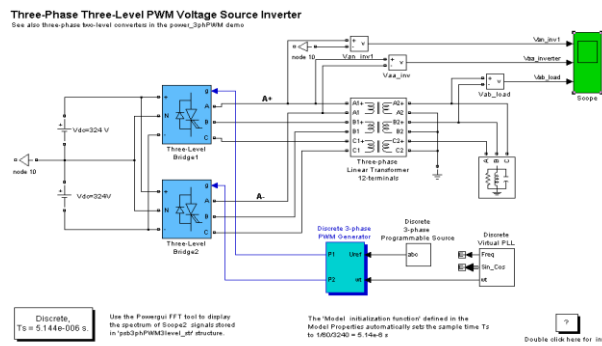


Fig. 5. Inversor monofásico de 2 niveles.

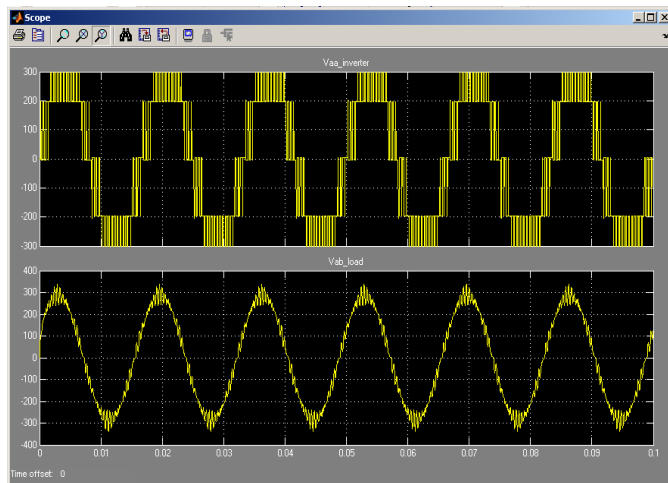


Fig. 6. Voltaje de salida del inversor monofásico de 2 niveles.

Como se aprecia el voltaje de salida del inversor cuando se incrementa el número de niveles se reduce la distorsión armónica

En la Fig. 7, se muestra la configuración de un inversor monofásico multinivel en puente H de 5 niveles, en función de la secuencia de disparo de los elementos de potencia.

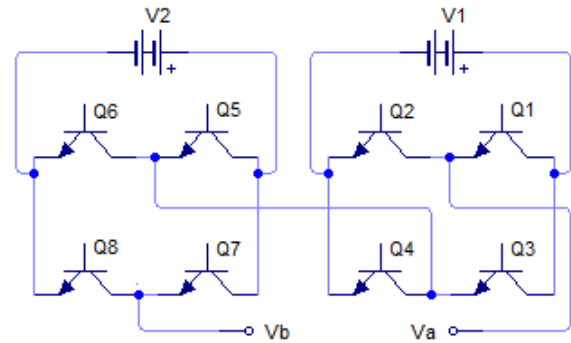


Fig. 7. Inversor monofásico de 5 niveles.

Como se observa en la Fig. 7, el inversor en cascada para 5 niveles, solo cuenta con dos puentes H, esto es posible ya que las fuentes de voltaje de CD son asimétricas, la onda de salida del inversor contará con 5 niveles en función de la secuencia de conmutación de los elementos de potencia.

Para la conmutación de los IGBTs es necesario una secuencia de disparo, en la Tabla 1 se muestra la secuencia de disparo para 5 niveles, considerando una duración de 16.66 ms, por período para garantizar la frecuencia de la RED (60 Hz).

Tabla 1. Secuencia de conmutación para 5 niveles.

Q1	Q2	Q3	Q4	Q5	Q6	Q7	Q8
0	1	0	1	1	0	1	0
1	0	0	1	1	0	1	0
1	0	0	1	1	0	0	1
1	0	0	1	1	0	1	0
0	1	0	1	1	0	1	0
0	1	0	1	1	0	1	0
0	1	1	0	0	1	0	1
0	1	1	0	0	1	1	0
0	1	1	0	0	1	0	1
0	1	0	1	1	0	1	0
0	1	0	1	1	0	1	0

Como se aprecia en comparación con las otras dos topologías, el inversor multinivel en cascada requiere menos componentes para obtener el mismo número de niveles.

Métodos de Modulación Multinivel.

Para poder hacer uso adecuado de un inversor multinivel, es necesario utilizar alguna técnica de modulación, las cuales se han desarrollado y estudiado extensamente, [6].

Los métodos de control y modulación más relevantes para los convertidores multinivel, pueden ser clasificados de acuerdo a la frecuencia de conmutación, como se muestra en la Fig. 8.

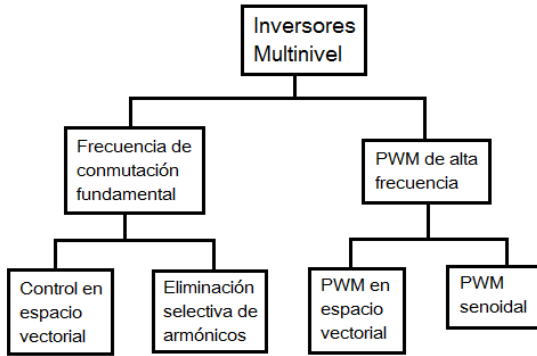


Fig. 8. Clasificación de métodos de modulación multinivel.

Eliminación Selectiva de Armónicos (SHE).

La Fig. 9 se muestra una forma de onda escalonada generalizada, sintetizada por un inversor de (2m+1) niveles, donde m es el número de ángulos de conmutación. Analizando la señal por series de Fourier de acuerdo a [11] - [13], se tiene que:

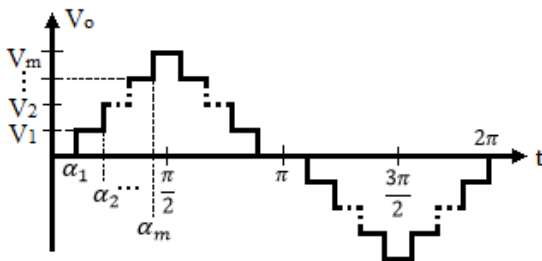


Figura 9. Forma de onda escalonada generalizada.

El voltaje a la salida del inversor puede expresarse como:

$$V_o(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1,2,\dots}^{\infty} (a_n \cos(n\omega t) + b_n \text{sen}(n\omega t))$$

Donde:

$$a_0 = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} v_o(\omega t) d(\omega t)$$

$$a_n = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} v_o(\omega t) \cos(n\omega t) d(\omega t)$$

$$b_n = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} v_o(\omega t) \text{sen}(n\omega t) d(\omega t)$$

Por lo tanto, al resolver las integrales anteriores se obtiene para  $a_0=0$  y  $a_n=0$ :

$$b_n = \frac{2V_{cd}}{\pi n} (\cos(n\alpha)) (1 - (-1)^n)$$

$$V_o(t) = \sum_{n=1,3,5,\dots}^{\infty} \left[ \frac{4V_{cd}}{\pi n} \cos(n\alpha) \right] \text{sen}(n\omega t)$$

Entonces, la amplitud de cualquier  $n_{mo}$  armónico impar de la onda escalonada puede ser expresado como:

$$h_n = \frac{4V_{cd}}{\pi n} \sum_{i=1}^m [\cos(n\alpha_i)]$$

Donde n es el orden del armónico impar, m es el número de ángulos de conmutación y  $\alpha_i$  es el  $i_{mo}$  ángulo de conmutación. De acuerdo a la figura 9, entre  $\alpha_1$  y  $\alpha_m$  se debe satisfacer que  $\alpha_1 < \alpha_2 < \dots < \alpha_m < \pi/2$ , es muy importante que se cumpla que todos los ángulos sean menores a  $\pi/2$ , para la correcta eliminación de armónicos.

Para minimizar la distorsión armónica, (m-1) del contenido armónico puede ser eliminado de la forma de onda del voltaje. Para poder hacer esta eliminación es necesario elegir los armónicos más significativos y los ángulos que corresponde a cada uno de estos.

Para eliminar los armónicos deseados se utiliza el método de Newton-Raphson [4]. Este método se basa en una aproximación inicial y generalmente converge en un cero de un sistema dado de ecuaciones no lineales [14].

II. CONCLUSIONES

La topología que posee las mejores características de desempeño en inversores multinivel es la de cascada con puentes H ya que tiene bajo contenido de armónicos y alta eficiencia en el proceso de conversión.

Las técnicas de control de los inversores multinivel en puente H permiten modificar la forma de generación de las ondas de voltaje y corriente ya que la secuencia de conmutación puede variar dependiendo de las variaciones de voltaje de forma equilibrada para evitar grandes saltos de voltaje entre un escalón y otro, ya que de no cumplirse esto genera que aumente la distorsión armónica total (THD).

III. REFERENCIAS

[1] D. Gielen, R. Kempener, M. Taylor, F. Boshell y A. Seleem, IRENA (2016), "Letting in the Light: How solar PV will revolutionise the electricity system", Abu Dhabi, [Online], Disponible: <http://www.irena.org/menu/index.aspx?mnu=Subcat&PriMenuID=36&CatID=141&SubcatID=2735>

[2] S. B. Kjaer, J. K. Pedersen, and F. Blaabjerg, "A review of singlephase grid connected inverters for photovoltaic

- modules”, IEEE Trans. Ind. Appl., vol. 41, no. 5, pp. 1292–1306, Sep./Oct. 2005.
- [3] R. Mechouma, B. Azoui, and M. Chaabane, “Three-phase grid connected inverter for photovoltaic systems, a review”, Renewable Energies and Vehicular Technology (REVET), 2012 First International Conference, Mar. 2012, pp. 37-42.
- [4] A. Nabae, I. Takahashi y H. Akagi, “A new neutral-point clamped PWM invertir”, IEEE Trans. Ind. Appl., vol. IA-17, no. 5, pp. 518–523, Sep./Oct. 1981.
- [5] P. M. Bhagwat y V. R. Stefanovic, “Generalized structure of a multilevel PWM invertir”, IEEE Trans. Ind. Appl., vol. 19, no. 6, pp. 1057–1069, Nov./Dic. 1983.
- [6] J. Rodríguez, J. S. Lai, F. Z. Peng “Multilevel Inverters: A Survey of Topologies, Controls And Applications”, IEEE Trans. Ind. Electronics, Vol. 49, No. 4, AUGUST 2002, pp. 724-738.
- [7] P. Panagis, et al., “Comparison of State of the Art Multilevel Inverters”, IEEE Power Electronics Specialists Conference, 2008, PESC. Pp. 4296-4300
- [8] I. Colak, E. Kabalci, R. Bayindir “Review of Multilevel Voltage Source Inverter Topologies and Control Schemes”, Energy Conversion and Magnament September 2010 pp. 1114-1128.
- [9] R.H. Baker, High-Voltage Converter Circuit, U.S. Patent Number 4,203,151, May 1980.
- [10] M. Rashid, “Inversor multinivel”, Electrónica de potencia: Circuitos, dispositivos y aplicaciones, M. Horton, Pearson Prentice Hall, México, 2004, pp. 406-429.
- [11] R. Sakthivel, M. Murugesan, R. Senthilkumar, R. Sivakumar, “Selective armonics elimination PWM based multilevel inverter with reduced number of switches”, Quest International Multidiciplinary Research Journal, Vol. II, pp. 65-74, Junio 2013.
- [12] K. Sarker, D. Chatterjee, S.K. Goswami, “An optimized coordinated approach for harmonic minimization of Doubly Fed Induction Generator connected micro-grid system”, International Journal of Electrical Power & Energy Systems, Vol. 64, Enero 2015, pp. 58-70.
- [13] G. Nageswara Rao, P. Sangameswara Raju, K. Chandra Sekhar, “Harmonic elimination of cascaded H-bridge multilevel inverter based active power filter controlled by intelligent techniques”, International Journal of Electrical Power & Energy Systems, Vol. 61, Octubre 2014, pp. 56-63.
- [14] C. Woodford y C. Phillips, “Numerical Methods with Worked Examples”, CHAPMAN & HALL, pp. 45-57, First edition 1997.

#### IV. BIOGRAFÍAS

**Ana Gabriela Sánchez Reyna.** Ingeniera en Comunicaciones y Electrónica. Actualmente es Alumna de la Maestría en Ciencias de la Ingeniería de la Universidad Autónoma de Zacatecas, Zacatecas, México. [ing.agsreyna19@gmail.com](mailto:ing.agsreyna19@gmail.com)

**Dr. Francisco Eneldo López Monteagudo.** Es Profesor-Investigador Titular de la Escuela de Ingeniería Eléctrica de la Universidad Autónoma de Zacatecas, Zacatecas, México. [eneldolm@yahoo.com](mailto:eneldolm@yahoo.com)

**Dr. Jorge de La Torre y Ramos.** es Profesor-Investigador Titular de la Escuela de Ingeniería Eléctrica de la Universidad Autónoma de Zacatecas, Zacatecas, México. [jorgetorre@uaz.edu.mx](mailto:jorgetorre@uaz.edu.mx)