

# INVERSORES MONOFÁSICOS MULTINIVEL INTERCONECTADOS A LA RED APLICADOS EN FUENTES ALTERNAS DE ENERGÍA

Ana Gabriela Sánchez Reyna<sup>1</sup>, Francisco Eneldo López Monteagudo<sup>2</sup>,  
Jorge de La Torre y Ramos<sup>3</sup>

**Resumen**— En el presente artículo se analizan varias topologías de inversores multinivel, con el objetivo de definir la topología más apropiada para sistemas interconectados a la RED, llegándose a la conclusión que la topología que ofrece mejores resultados para esta aplicación es aquella que utiliza puentes H en cascada. Para el control del inversor 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

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 atmósfera 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 (D. Gielen et al. 2016), 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 esto se han estudiado y analizado diferentes topologías de inversores (S. B. Kjaer et al. 2005 y R. Mechouma et al. 2012). 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.

## II. 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 de acuerdo a lo propuesto por A. Nabae et al. (1981) y P. M. Bhagwat y V. R. Stefanovic (1983).

Las conmutaciones de los semiconductores de potencia permiten obtener una onda casi sinusoidal, 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 dependen del tipo de acoplamiento que existe entre los diferentes niveles, siendo las más populares:

- Inversores Multinivel de Diodo Anclado.
- Inversores Multinivel con Capacitor Flotante.

<sup>1</sup> La Ingeniero en Comunicaciones y Electrónica Ana Gabriela Sánchez Reyna 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)

<sup>2</sup> El 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)

<sup>3</sup> El 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)

- 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, de acuerdo a lo propuesto por J. Rodríguez et al. (2002).

*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 (J. Rodríguez et al. 2002, P. Panagis, et al. 2008, I. Colak et al. 2010), 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 figura 1 se muestra su configuración para de 5 niveles.

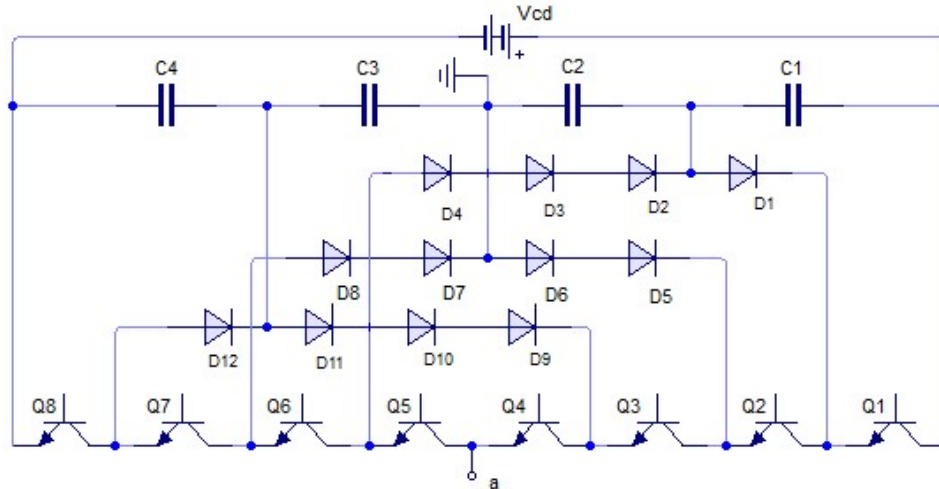


Figura 1. Inversor multinivel de diodo anclado de 5 niveles.

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 de R.H. Baker (1980), 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, de acuerdo a R. Sakthivel et al. (2013).

*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 figura 2 se muestra su configuración circuital de 5 niveles.

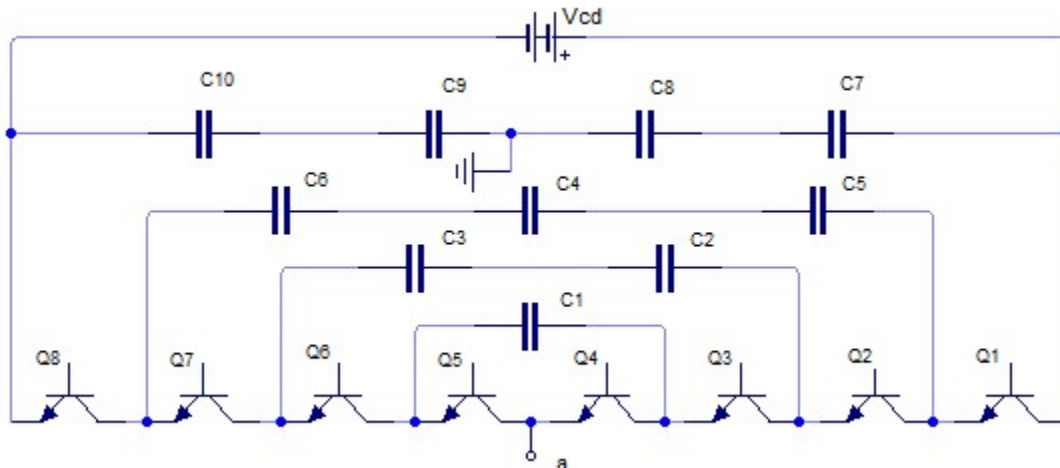


Figura 2. Inversor multinivel con capacitor flotante de 5 niveles.

En los inversores multinivel con capacitor flotante mientras más niveles de voltaje se quieran, mayor será el número de capacitores por lo que el control del inversor se vuelve más complejo, de acuerdo a R. Sakthivel et al. (2013).

### C. 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 sinusoidal 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, de acuerdo a lo propuesto por M. Rashid (2004). Se realizaron varias simulaciones con Matlab simulink. En la figura 3 se muestra la configuración utilizada para la simulación y en la 4 los resultados de la simulación para 2 niveles. Como se aprecia en el voltaje de salida del inversor, cuando se incrementa el número de niveles se reduce la distorsión armónica.

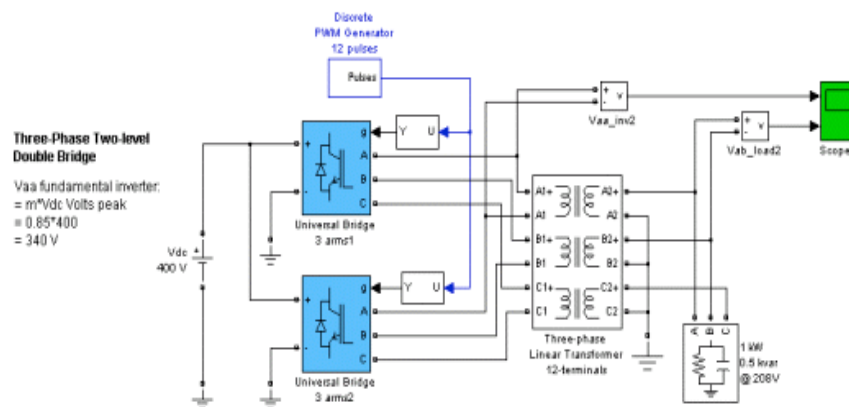


Figura 3. Inversor monofásico de 2 niveles.

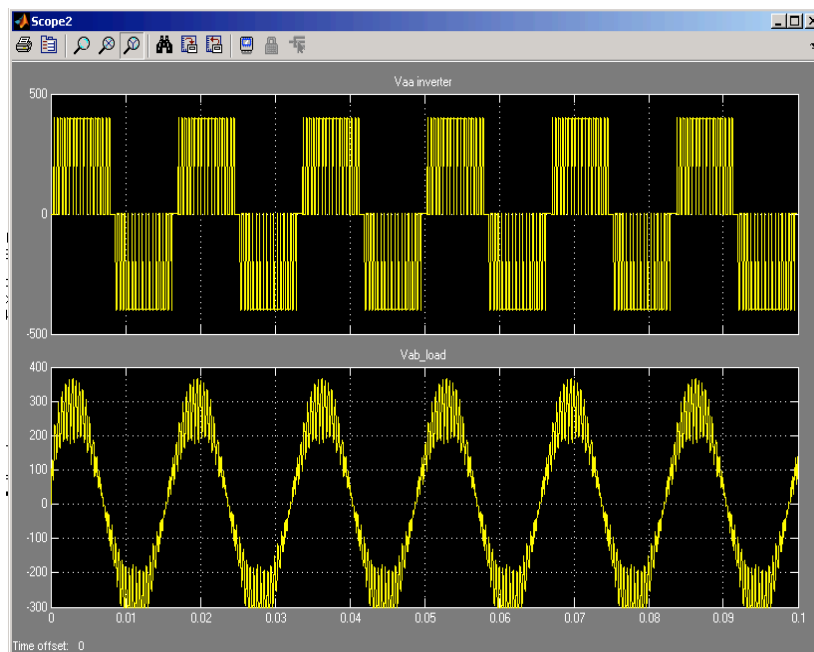


Figura 4. Voltaje de salida del inversor monofásico de 2 niveles.

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

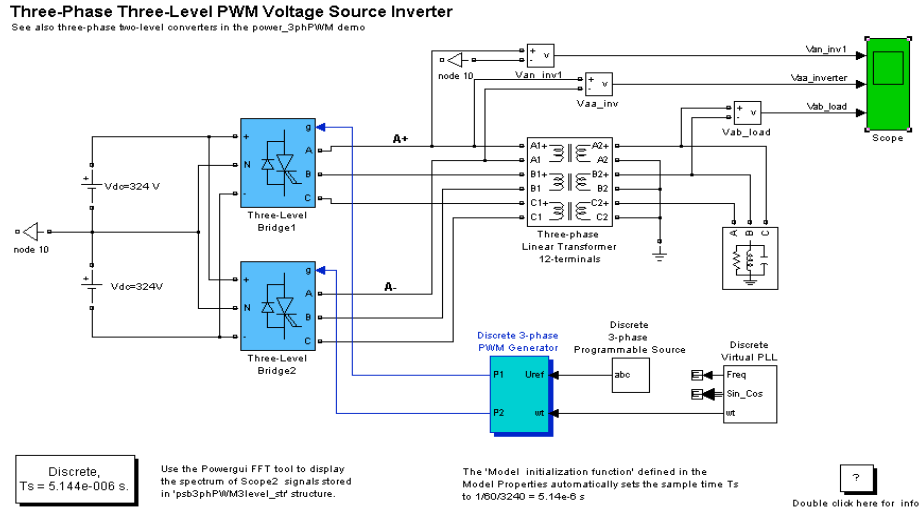


Figura 5. Inversor monofásico de 2 niveles.

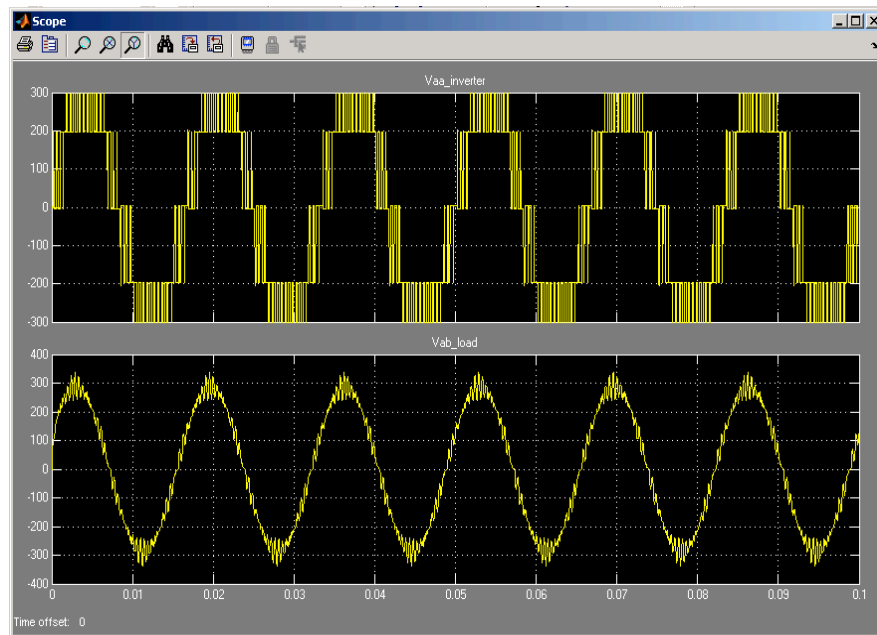


Figura 6. Voltaje de salida del inversor monofásico de 2 niveles.

En la figura 7, se muestra la configuración de un inversor monofásico multinivel en puente H de 11 niveles, en función de la secuencia de disparo de los elementos de potencia. Como se observa en la figura 7, el inversor en cascada de 11 niveles, solo cuenta con tres puentes H, esto es posible ya que las fuentes de voltaje de CD son asimétricas, la onda de salida del inversor contará con 11 niveles, y por lo tanto existen cinco ángulos de conmutación, uno de estos ángulos se encarga de definir la magnitud del voltaje fundamental, mientras que los otros cuatro ángulos de conmutación son utilizados para eliminar los armónicos que más convengan.

Las fuentes asimétricas deben cumplir con ciertas condiciones:  $V_1=V_{cd}$ ,  $V_2=3V_{cd}$  y  $V_3=6V_{cd}$ . Las fuentes de voltaje de CD permiten formar una onda escalonada con baja distorsión armónica total (THD). Para la conmutación de los IGBTs es necesario una secuencia de disparo como se muestra en la tabla 1, con una duración de 16.66 ms, por período para garantizar la frecuencia de la RED (60 Hz).

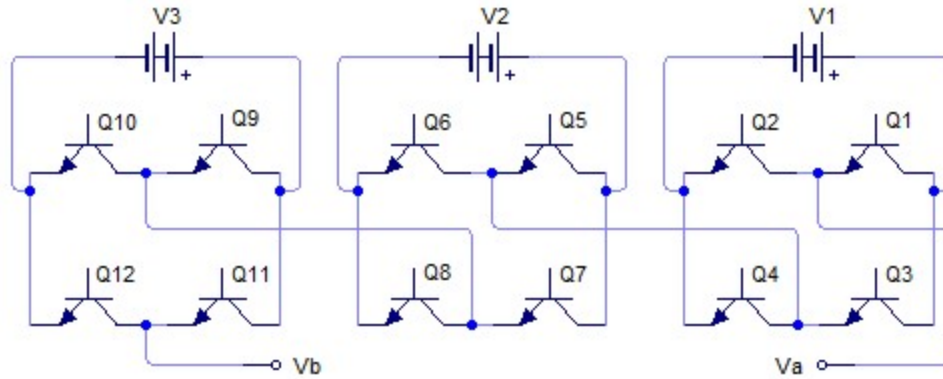


Figura 7. Inversor monofásico de 11 niveles

Tabla 1. Secuencia de conmutación para 11 niveles.

Q1	Q2	Q3	Q4	Q5	Q6	Q7	Q8	Q9	Q10	Q11	Q12
0	1	0	1	1	0	1	0	1	0	1	0
0	1	1	0	1	0	0	1	1	0	1	0
1	0	0	1	1	0	0	1	1	0	1	0
1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	0	1
0	1	1	0	1	0	0	1	1	0	0	1
1	0	0	1	1	0	0	1	1	0	0	1
0	1	1	0	1	0	0	1	1	0	0	1
1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	0	1
1	0	0	1	1	0	0	1	1	0	1	0
0	1	1	0	1	0	0	1	1	0	1	0
0	1	0	1	1	0	1	0	1	0	1	0
0	1	0	1	1	0	1	0	1	0	1	0
1	0	0	1	0	1	1	0	1	0	1	0
0	1	1	0	0	1	1	0	1	0	1	0
1	0	1	0	1	0	1	0	0	1	1	0
1	0	0	1	0	1	1	0	0	1	1	0
0	1	1	0	0	1	1	0	0	1	1	0
1	0	0	1	0	1	1	0	0	1	1	0
1	0	1	0	1	0	1	0	0	1	1	0
0	1	1	0	0	1	1	0	1	0	1	0
1	0	0	1	0	1	1	0	1	0	1	0
0	1	0	1	1	0	1	0	1	0	1	0
0	1	0	1	1	0	1	0	1	0	1	0

En comparación con las otras dos topologías, el inversor multinivel en cascada requiere menos componentes para obtener el mismo número de niveles. En la tabla 2 se muestra una comparación de las tres topologías analizadas y del número de componentes que cada una de ellas necesita por fase, donde n es el número de niveles.

Tabla 2. Comparaciones de topologías de acuerdo al número de componentes por fase

Tipo de convertidor	Diodo anclado	Capacitor flotante	Cascada
Conmutadores	$2(n-1)$	$2(n-1)$	$2(n-1)$
Diodos de anclaje	$2(n-2)$	0	0
Capacitores flotantes	0	$((n-1)(n-2))/2$	0
Capacitores del bus CD	$(n-1)$	$(n-1)$	$(n-1)/2$
Tensión de bloqueo de conmutadores	$V_{cd}/(n-1)$	$V_{cd}/(n-1)$	$V_{cd}$ (por celda)

### III. Simulación del Inversor Multinivel en Cascada

Para la simulación del inversor multinivel se utilizó la plataforma de OrCAD, que se muestra en la figura 8. La onda del voltaje de salida del inversor multinivel de once niveles se muestra en la figura 9.

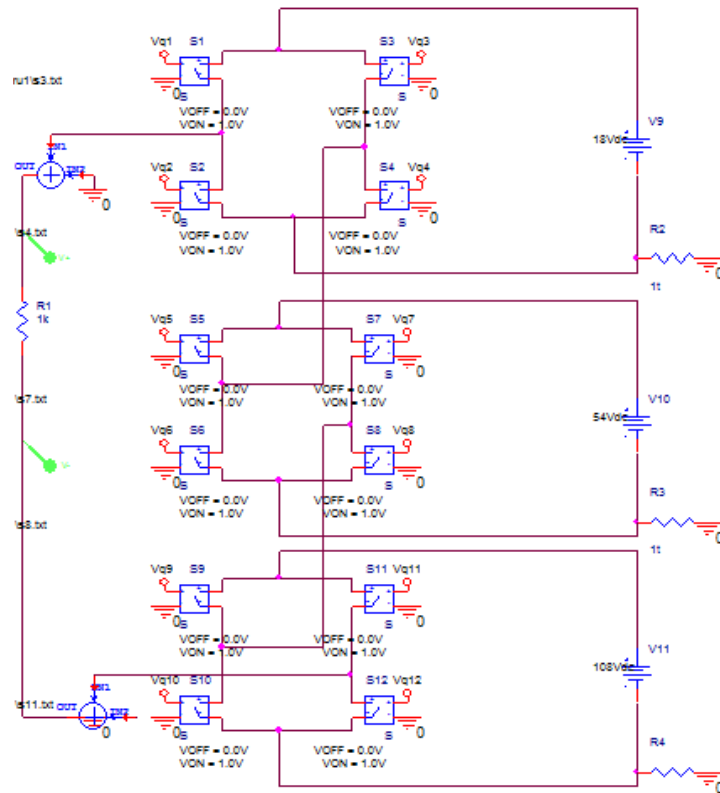


Figura 8. Circuito de inversor multinivel de once niveles.

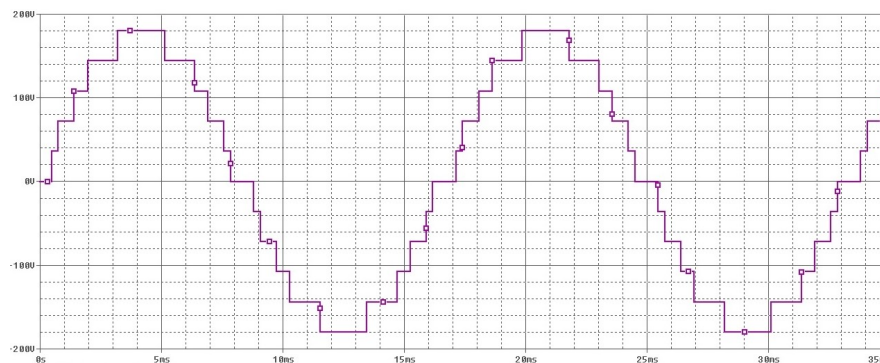


Figura 9. Onda de salida del inversor de once niveles.

### IV. 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 (J. Rodríguez et al. 2002). 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 figura 10.

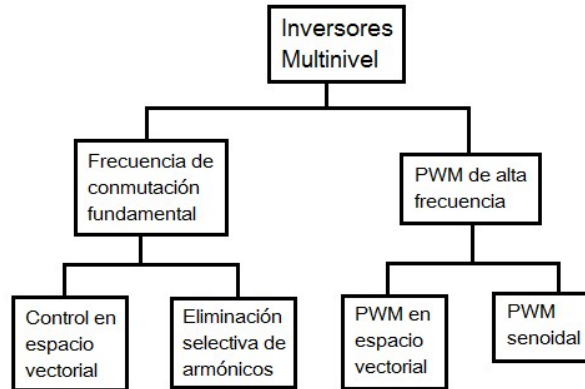


Figura 10. Clasificación de métodos de modulación multinivel.

**V. Eliminación Selectiva de Armónicos (SHE).**

La figura 11 muestra una forma de onda escalonada generalizada, sintetizada para 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 (R. Sakthivel et al. 2013, K. Sarker et al. 2015 y G. Nageswara Rao et al. 2014), se tiene que:

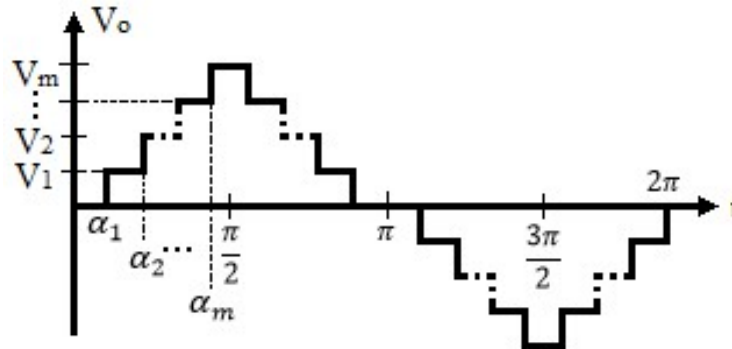


Figura 11. Forma de onda escalonada generalizada.

El voltaje a la salida del inversor puede expresarse como:

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

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 11, 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 corresponden a cada uno de estos.

El inversor multinivel en cascada descrito en este artículo tiene once niveles, tres fuentes de CD y cinco ángulos de conmutación. Un ángulo se utiliza para controlar la magnitud del voltaje fundamental y los cuatro ángulos restantes se utilizan para eliminar el 3°, 5°, 9°, y 11° armónicos, es necesario eliminar los armónicos múltiplos de tres ya que al tratarse de un inversor monofásico, estos se encuentran presentes en este tipo de inversores.

Para eliminar los armónicos deseados se utiliza el método de Newton-Raphson (A. Nabae et al. 1981). Este método se basa en una aproximación inicial y generalmente converge en un cero de un sistema dado de ecuaciones no lineales (C. Woodford y C. Phillips 1997).

### Comentarios Finales

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 cómo se quiera que sean los aumentos de voltaje, buscando que estos sean 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).

### Referencias

- R.H. Baker, High-Voltage Converter Circuit, U.S. Patent Number 4,203,151, May 1980.
- 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.
- I. Colak, E. Kabalci y R. Bayindir "Review of Multilevel Voltage Source Inverter Topologies and Control Schemes", Energy Conversion and Magnament September 2010 pp. 1114-1128.
- 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>
- S. B. Kjaer, J. K. Pedersen, y 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.
- R. Mechouma, B. Azoui, y 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.
- 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.
- G. Nageswara Rao, P. Sangameswara Raju y 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.
- P. Panagis, et al., "Comparison of State of the Art Multilevel Inverters", IEEE Power Electronics Specialists Conference, 2008, PESC. Pp. 4296-4300.
- M. Rashid, "Inversor multinivel", Electrónica de potencia: Circuitos, dispositivos y aplicaciones, M. Horton, Pearson Prentice Hall, México, 2004, pp. 406-429.
- J. Rodríguez, J. S. Lai y 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.
- R. Sakthivel, M. Murugesan, R. Senthilkumar y 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.
- K. Sarker, D. Chatterjee y S.K. Goswami, "An optimized co-ordinated 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.
- C. Woodford y C. Phillips, "Numerical Methods with Worked Examples", CHAPMAN & HALL, pp. 45-57, First edition 1997.