

Análisis de Inversores Multinivel Alimentados en Tensión con Capacidad de Elevación

Francisco Javier Chavero Ramírez

Instituto Tecnológico de Celaya
fcoja_chavrm@hotmail.com

Héctor Juan Carlos López Tapia

Instituto Tecnológico de Celaya
hector.lopez@itcelaya.edu.mx

Nimrod Vázquez Nava

Instituto Tecnológico de Celaya
n.vazquez@ieee.org

Claudia Verónica Hernández Gutiérrez

Instituto Tecnológico de Celaya
claudia.hernandez@itcelaya.edu.mx

RESUMEN

Los inversores multinivel son empleados principalmente en aplicaciones enfocadas a motores y a energías renovables. Tienen como finalidad el manejo de mayor potencia con una reducción de filtrado de la señal de salida que los inversores tradicionales, su principal ventaja es que dividen los esfuerzos de tensión y corriente de los dispositivos de conmutación. Por ello aún son interés de estudio, se proponen variantes a las estructuras básicas y se estudian nuevas técnicas de modulación o esquemas de control [1]. Recientemente se han encontrado estructuras multinivel con capacidad de elevación, la cual permite generar un número mayor de niveles de tensión, reduciendo el número de componentes comparadas con las estructuras básicas. Por tal motivo este artículo presenta la comparación entre estructuras multinivel con capacidad de

elevación para resaltar las ventajas que proporcionan con respecto a las topologías básicas.

Palabras clave: Topología, Inversor multinivel, elevación, modulación.

1. Introducción

Con la demanda cada vez mayor en la calidad del suministro de alimentación de energía eléctrica, la estructura del inversor multinivel es una buena opción para usarse en compensación de potencia reactiva. Por la forma en que se dividen los esfuerzos en tensión o corriente de los dispositivos conmutadores, permite manejar altas potencias con pocas armónicas [2]. A mayor número de niveles de tensión disminuye la distorsión armónica de la onda de salida.

La forma más general de entender los convertidores CD/CA multinivel es considerarlo como un seleccionador de tensión, ver figura 1. La tensión alterna de salida se obtiene a partir de diferentes niveles de tensión de continua de entrada. Siendo esta la diferencia básica respecto a un convertidor CD-CA convencional, donde la tensión de continua de entrada presenta un único nivel.

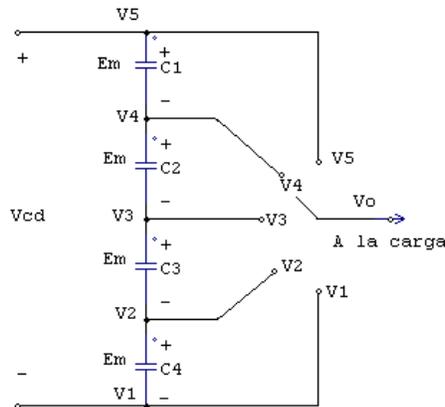


Figura 1. Esquema de un polo de inversor multinivel por un interruptor.

2. Inversor Multinivel

El convertidor multinivel sintetiza una tensión senoidal a partir de varios niveles de tensión de CD, los cuales se obtienen a través de fuentes de tensión, la figura 2 muestra la forma de onda de salida de un inversor multinivel formada por escalones de tensión.

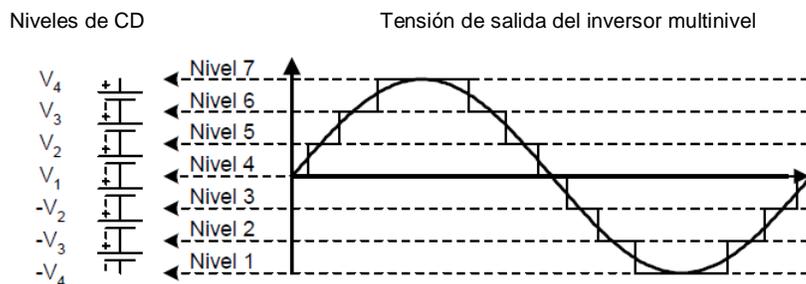


Figura 2. Tensión de salida de un inversor multinivel.

Los inversores multinivel se pueden clasificar en tres estructuras básicas [3] [4].

- Inversor Multinivel con Diodo Fijador (DCMLI, por sus siglas en inglés).
- Inversor Multinivel con Capacitores Flotantes (FCMLI, por sus siglas en inglés).
- Inversor en Cascada (CMLI, por sus siglas en inglés).

2.1 Inversor Multinivel con Diodo Fijador (DCMLI) [5]

También conocido como convertidor fijador de punto neutro (NPC, por sus siglas en inglés) [6]. DCMLI sintetiza una onda senoidal a partir de varios niveles de tensión, obtenida de capacitores que funcionan como fuentes de CD. Este tipo de inversor utiliza capacitores en serie para dividir la tensión, de esta manera los dispositivos de potencia operan con una tensión menor entre sus terminales. Estos niveles se definen como el

número de valores de potencial posibles a la salida del convertidor referido a un punto de referencia común. Ver figura 3.

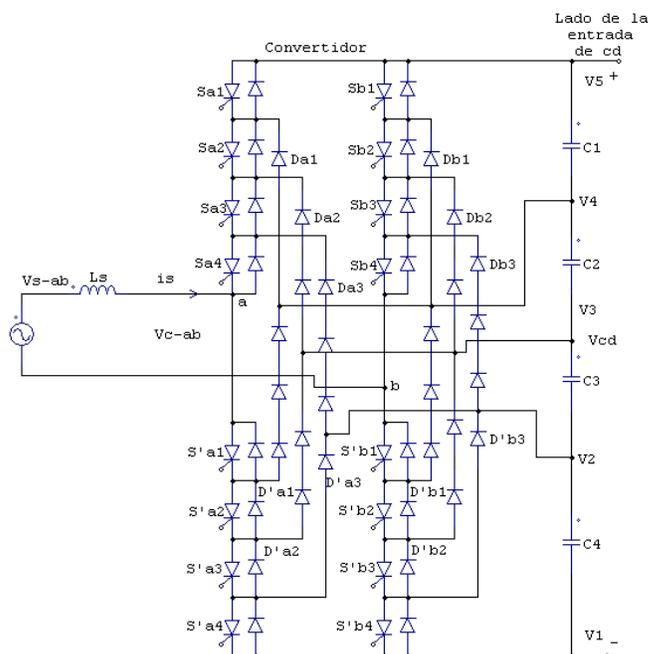


Figura 3. Inversor multinivel de cinco niveles DCMLI.

Las principales características del DCMLI son las siguientes:

- Diferente especificación nominal de corriente del dispositivo conmutador.
- Al aumentar el número de niveles se requieren más diodos.
- Diferente especificación de bloqueo de los diodos.
- Es necesario que las tensiones de los capacitores se mantengan balanceadas en cualquier punto de trabajo.

2.1 Inversor Multinivel con Capacitores Flotantes (FCMLI) [7]

Este tipo de inversor multinivel utiliza una estructura escalonada de capacitores, en donde la salida puede expresarse como las posibles combinaciones de conexión de los capacitores de los que se compone, utiliza capacitores para establecer los niveles de

tensión. Esta topología introduce mas estados de conmutación que pueden ser usados para mantener balanceada la carga de los capacitores. En la estructura de un inversor multinivel monofásico de cinco niveles, ver figura 4. Se observa que no necesita de diodos extra para proporcionar los niveles de tensión.

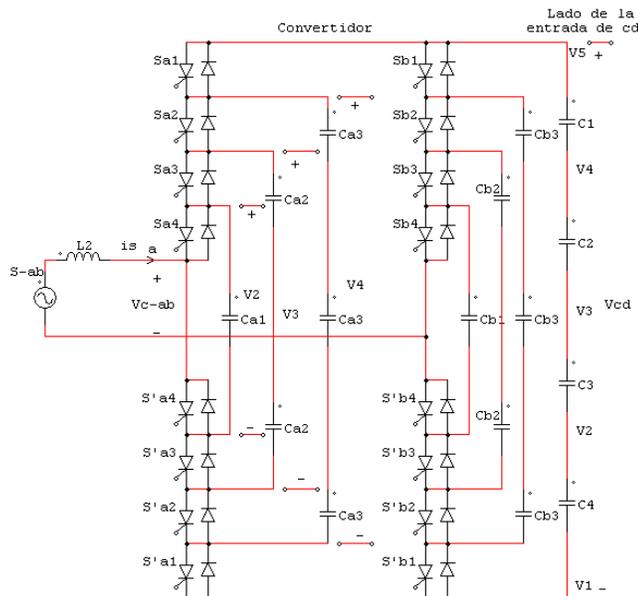


Figura 4. Inversor multinivel de cinco niveles FCMLI.

Las principales características del FCMLI son las siguientes:

- Conforme aumenta el número de niveles se requiere de más capacitores.
- El esfuerzo en tensión de los dispositivos disminuye conforme aumenta el número de niveles.
- Proporciona redundancia de estados para la generación de ciertos niveles, permitiendo flexibilidad para mantener la carga en los capacitores.
- El arranque es más complejo que en el inversor multinivel diodo fijador.
- Maneja potencia activa y reactiva.

2.3 Inversor Multinivel en Cascada (CMLI) [8]

Este tipo de inversor consiste en una serie de unidades inversoras de puente completo, ver figura 5, y tiene como objetivo sintetizar la tensión deseada a partir de la suma de varios niveles de tensiones de CD que pueden ser obtenidos de baterías, celdas solares, o cualquier otro tipo de fuente de CD que sean independientes, es por ello que es muy recomendable el uso de esta estructura en sistemas de energía renovable, en vehículos eléctricos, en variadores de velocidad y en fuentes de CA.

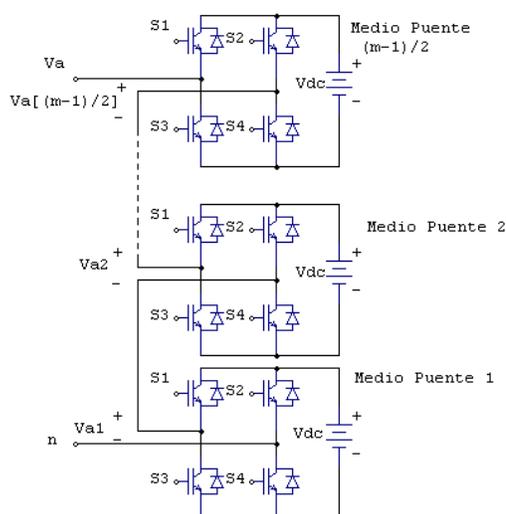


Figura 5. Inversor multinivel monofásico en cascada.

El inversor en cascada no requiere de diodos fijadores o de capacitores de balanceo de tensión. Sus principales características son:

- Gran flexibilidad para poder incrementar el número de niveles, solo se necesita agregar inversores sin tener que rediseñar la etapa de potencia.
- La tensión de fase es la suma de las tensiones de salida de los inversores puente completo individuales.
- Maneja potencia activa y reactiva.

Las topologías multinivel son muy estudiadas, se proponen variantes a las estructuras básicas y se estudian nuevas técnicas de modulación o esquemas de control [1]. La principal área de investigación en las topologías de diodos fijadores y de capacitores flotantes es el balance de tensión de cada capacitor, mientras que para la topología de inversores en cascada el principal objetivo es reducir el número de fuentes de cd que necesita. Recientemente se ha encontrado en la literatura nuevos trabajos relacionados con la estructura multinivel con la capacidad de elevación de tensión, la cual ofrece mejores características con respecto a las topologías convencionales. A continuación se muestra un breve resumen de cada uno de ellos.

2.4 Inversor multinivel de fuente simple basado en un capacitor conmutado

En [9] se presenta un inversor multinivel de cinco niveles basada en la combinación de un convertidor con capacitor conmutado y un convertidor de puente completo con S_{ab} auxiliar, ver figura 6. El convertidor con capacitor conmutado balancea los capacitores y sintetiza los niveles de tensión de salida. S_{ab} ayuda a incrementar el número de niveles de tensión.

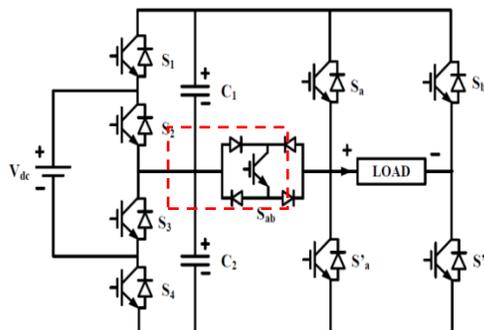


Figura 6. Estructura del inversor de cinco niveles propuesta.

La operación completa del inversor multinivel esta dividido en cinco diferentes modos. Ver tabla 1.

Tabla 1. Modos de operación.

	S_1	S_2	S_3	S_4	S_a	S_b	S_{ab}	V_o
Modo 1	0	0	0	0	1	1	0	0
Modo 2	0	1	0	1	1	0	1	V_{dc}
Modo 3	1	0	1	0	0	1	1	$-V_{dc}$
Modo 4	0	0	0	0	1	0	0	$2 V_{dc}$
Modo 5	0	0	0	0	0	1	0	$-2 V_{dc}$

Para el modo 1: S_a y S_b están encendidos. Pero C_1 y C_2 permanecen descargados.

Por lo que el $V_o = 0$.

Para el modo 2: S_2 y S_4 son activados para conectar C_2 en paralelo con la fuente de alimentación, de esta manera se carga a V_{dc} . Al mismo tiempo S_{ab} y S_b son encendidos para producir V_{dc} a la salida. Por lo que $V_o = V_{dc}$.

Para el modo 3: S_1 , S_3 , S_{ab} y S_b son encendidos simultáneamente para cargar C_1 a V_{dc} .

Obteniendo $-V_{dc}$ a la salida.

Para el modo 4: S_a y S_b están activados por lo que se están descargando C_1 y C_2 conectados en serie para generar $2V_{dc}$ a la salida.

Para el modo 5: Es similar al modo de operación 4, excepto por el hecho de que se encienden S_b y S_a . Por lo que se obtiene $-2V_{dc}$ a la salida.

Estos cinco modos completan un ciclo de operación. La tensión de salida obtenida comprende cinco niveles: $\pm 2V_{dc}$, $\pm V_{dc}$ y 0.

2.5 Nuevo inversor multinivel elevador de capacitor conmutado usando carga parcial

En [10] consiste en tres etapas como se observa en la figura 8. La etapa de carga parcial, la etapa del capacitor conmutado y la etapa del inversor.

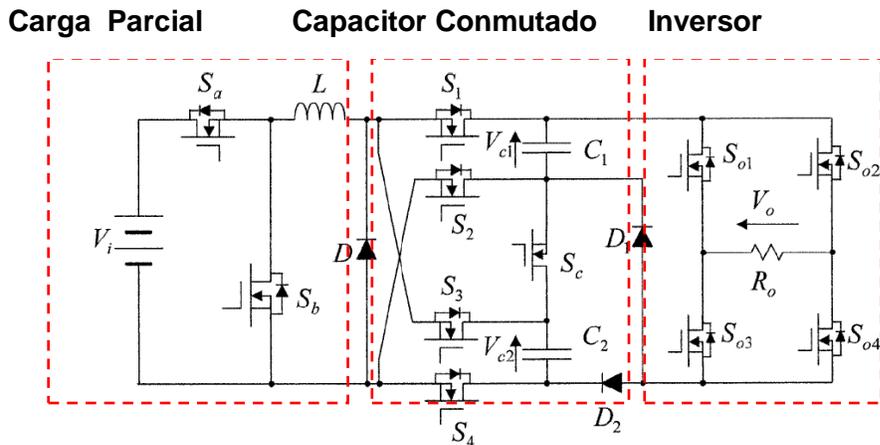


Figura 8. Inversor multinivel con capacidad de elevación.

La etapa de carga parcial es una combinación entre el convertidor reductor y el convertidor elevador. La etapa del capacitor conmutado está formada por $S_1, S_2, S_3, S_4, S_C, C_1, C_2$, y D_1 y D_2 . Cada capacitor está asociado con los interruptores, los cuales los pueden cargar o descargar independientemente. La etapa del inversor esta formado por S_{O1}, S_{O2}, S_{O3} y S_{O4} , la cual es la responsable de cargar la polaridad de la salida de tensión.

La topología propuesta trabaja con ocho modos de operación por ciclo. Los primeros cuatro (Modo 1-Modo 4) comprenden el ciclo positivo mientras que los cuatro restantes (Modo 5-Modo 8) comprenden el ciclo negativo. Por lo que las formas de onda de salida de la tensión se muestran en la figura 9, en donde se aprecia en que tiempos ocurre el

nivel de tensión. En el tiempo t_0 , C_1 y C_2 están completamente descargados al inicio de cada ciclo.

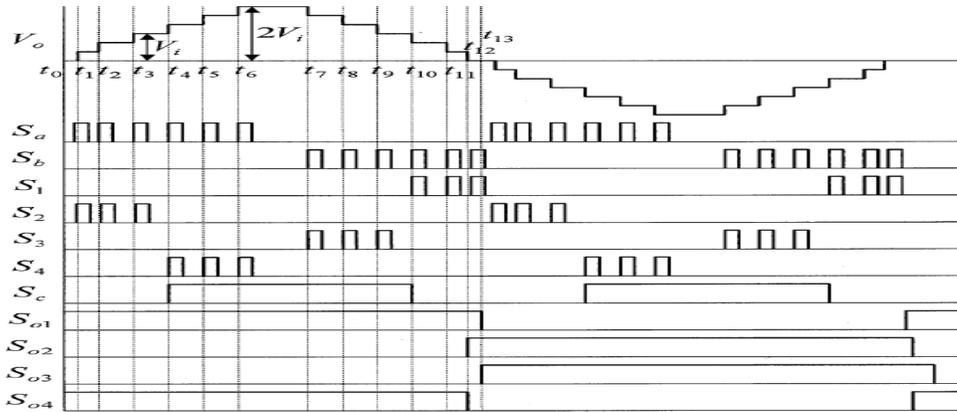


Figura 9. Formas de onda.

Para el modo 1: Comprende de t_1 al t_4 . La etapa de carga parcial trabaja como un reductor. Mientras S_a y S_2 están encendidos para cargar C_1 con tres diferentes niveles de tensión, los cuales son: $V_i/3$, $2V_i/3$ y V_i . Además, S_{o1} y S_{o4} están activados para generar la tensión de salida positiva (V_o). Los pulsos son aplicados en los instantes t_1 , t_2 y t_3 . Por lo tanto los niveles de tensión están determinados de la siguiente manera:

- $V_o(t_1 + \Delta t_1) = V_i/3$.
- $V_o(t_2 + \Delta t_2) = 2V_i/3$.
- $V_o(t_3 + \Delta t_3) = V_i$.

Para el modo 2: Comprende de t_4 a t_7 . Similar al modo 1, solo que S_a y S_4 son encendidos simultáneamente para cargar C_2 con los valores de $V_i/3$, $2V_i/3$ y V_i . S_c esta encendido para conectar en serie C_1 y C_2 . Los pulsos son aplicados en los instantes t_4 , t_5 y t_6 . S_{o1} y S_{o4} están encendidos para generar la tensión positiva (V_o). Por lo que los niveles de tensión están determinados de la siguiente manera:

- $V_o(t_4+\Delta t_4)=4V_i/3.$
- $V_o(t_5+\Delta t_5)=5V_i/3.$
- $V_o(t_6+\Delta t_6)=2V_i.$

Para el modo 3: Se realiza entre t_7 t t_{10} . La carga parcial trabaja como un convertidor elevador. S_b y S_3 son activados simultáneamente para que C_2 se descargue a $2V_i/3$, $V_i/3$ y a 0. S_c permanece encendido para conectar C_1 y C_2 en serie. S_{01} y S_{04} están activados para generar la tensión positiva (V_o). Por lo que los niveles de tensión en los instantes (t_7 , t_8 y t_9) son:

- $V_o(t_7+\Delta t_7)=5V_i/3.$
- $V_o(t_8+\Delta t_8)=4V_i/3.$
- $V_o(t_9+\Delta t_9)=V_i.$

Para el modo 4: Comprende de t_{10} a t_{13} . S_c se desactiva por lo que C_1 y C_2 dejan de estar conectados en serie. Similar al modo 3, S_b y S_1 se desactivan para que C_1 se descargue a $2V_i/3$, $V_i/3$ y 0. S_{04} y S_{02} están activados hasta que C_1 está completamente descargado. Después de que se desactiva S_{04} , S_{02} se activa para permitir el libre rodamiento de la corriente de la carga inductiva. Por lo que los niveles de tensión en los instantes (t_7 , t_8 y t_9) son:

- $V_o(t_{10}+\Delta t_{10})=2V_i/3.$
- $V_o(t_{11}+\Delta t_{11})=V_i/3.$
- $V_o(t_{12}+\Delta t_{12})=0.$

Los modos de operación 5, 6, 7 y 8 son similares a los modos 1, 2, 3 y 4; excepto que S_{02} y S_{03} son activados para cambiar la polaridad de la tensión de salida (V_o).

4. Comparación

El número de componentes necesarios para implementar un inversor multinivel de 13 niveles, se muestra en la tabla 2. Se aprecia que las dos topologías con capacidad elevadora requieren de menos componentes en comparación con las topologías convencionales. Sin embargo en [9] requiere de un número mayor de componentes en comparación con [10].

Tabla 2. Generalización de números de elementos para un inversor multinivel de 13 niveles.

Topología	DCMLI	FCMLI	CMLI	[9]	[10]
Niveles de tensión de salida	13	13	13	13	13
Número de Diodos	132	0	0	0	3
Número de Capacitores	12	66	0	6	2
Número de Interruptores	24	24	24	19	11
Fuentes de Alimentación	1	1	6	1	1
Capacidad de Elevación	No	No	No	Si	Si

A continuación se muestran los resultados experimentales de los inversores multinivel con capacidad de elevación en donde se compara el contenido armónico generado en la tensión de salida. En la figura 10 a), la distorsión generada por [9] es mayor que la generada por [10], mostrada en la figura 10 b).

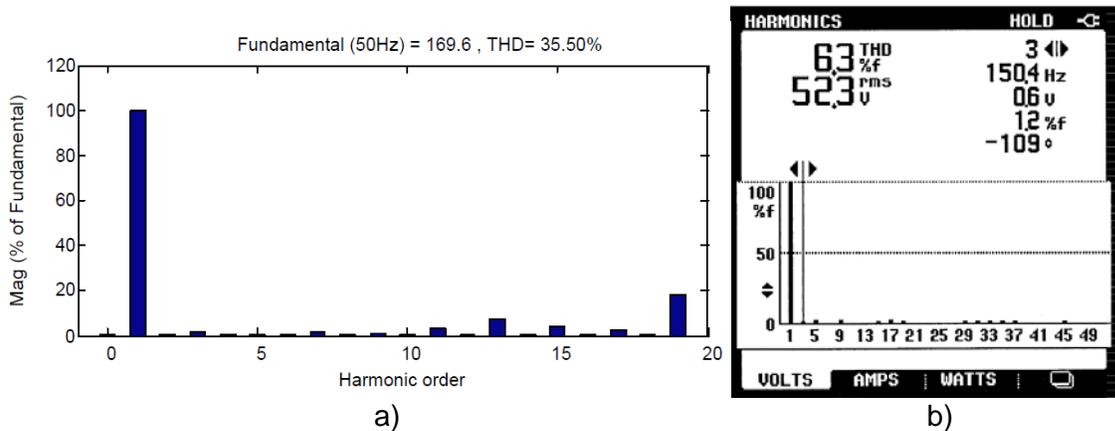


Figura 10. Contenido armónico de la señal multinivel a) referencia [9], b) referencia [10].

De acuerdo a las gráficas, entre más niveles se generen en un inversor multinivel se reducen los armónicos lo que permite que el filtro de salida sea menor. Finalmente, se compara el balance de tensión de los capacitores. En la figura 11, se observa que la tensión de C_1 y C_2 se mantienen más constantes, mientras que en la figura 12, se observa que es mayor la descarga de C_1 y C_2 . El mantener una tensión constante permite que la dinámica del sistema sea más rápido frente al cambio de cargas. Mientras tanto en [10], la generación de los niveles de tensión depende de la dinámica de la etapa de carga parcial de los capacitores. Ya que tienden a descargarse a cero, el sistema tarda más en responder a cambios de carga, debido a que requieren cargarse a la tensión del nivel N deseado.

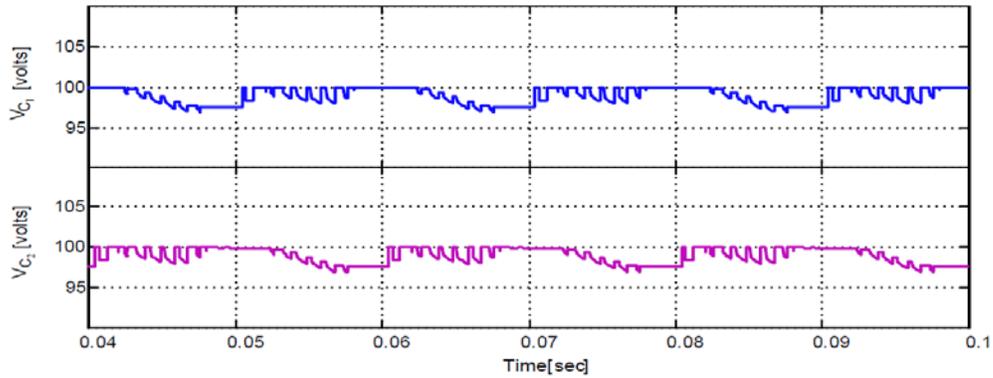


Figura 11. Carga en los capacitores C_1 y C_2 [9].

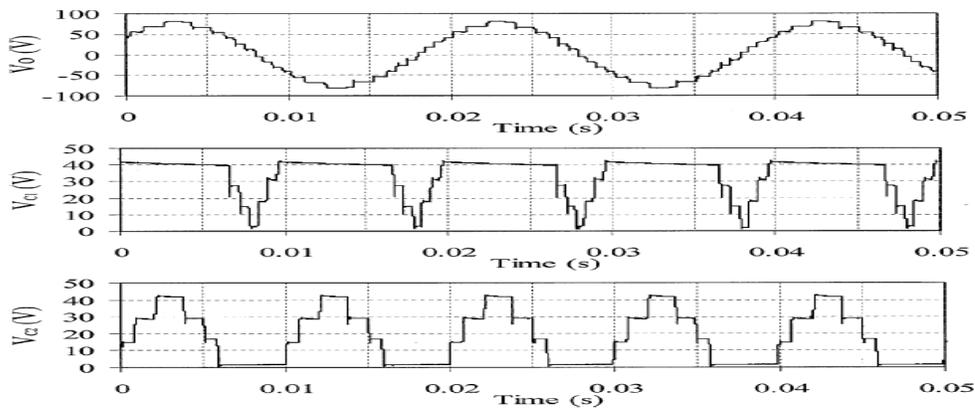


Figura 12. Carga en los capacitores C_1 y C_2 [10].

5. Conclusión

Los inversores multinivel con capacidad de elevación requieren de un menor número de componentes en comparación a las topologías convencionales para N niveles. La topología [10] requiere de menos componentes para generar 13 niveles, además se reducen considerablemente los armónicos en la tensión de salida en comparación a la topología presentada en [9]. La desventaja en [10] es la tensión en los capacitores ya que tienden a una caída casi a cero. Esto implica que la dinámica para generar el nivel N dependa de la dinámica de la carga de los capacitores. Por lo que el sistema tarda

más tiempo para compensar los cambios de cargas. Por otra parte una desventaja más de [9] es que en los modos de operación 2 y 3 los capacitores están conectados en paralelo con la fuente de alimentación, lo cual provoca un pico de corriente, la cual implica que se sobredimensionen las especificaciones de los componentes.

Referencias

- [1] Kouro, S.; Malinowski, M.; Gopakumar, K.; Pou, J.; Franquelo, L.G.; Bin Wu; Rodriguez, J.; Perez, M.A.; Leon, J.I.; "Recent Advances and Industrial Applications of Multilevel Converters," Industrial Electronics, IEEE Transactions on, Vol. 57. No. 8. pp. 2553-2580, 2010.
- [2] Nilkar, M.; Babaei, E.; Sabahi, M.; "A New Single-Phase Cascade Multilevel Inverter Topology Using Four-Level Cells," Electrical Engineering (ICEE), 20th Iranian Conference on, pp. 348-353, 2012.
- [3] Mittal, N.; Singh, B.; Singh, S.P.; "Multilevel Inverters: A Literature Survey on Topologies and Control Strategies," Power, Control and Embedded Systems (ICPCES) 2nd International Conference on, pp. 1-11, 2012.
- [4] Panagis, P.; Stergiopoulos, F.; Marabeas, P.; Manias, S.; "Comparison of State of the Art Multilevel Inverters," Power Electronics Specialists Conference. PESC. IEEE, pp. 4296- 4301, 2008.
- [5] Keith Corzine, "Multilevel Converter" The Power Electronics Handbook, Universidad de Wisconsin-Milwaukee, Capítulo 6, 2002.

- [6] A. Nabae, I. Takahashi, H. Akagi, "A new Neutral-Point-Clampend PWM Inverter," IEEE Trans. Ind. Applicat, Vol. IA-17, No. 5, pp. 518-523, Sep/Oct. 1981.
- [7] Koblre, P.; Pavelka, J.; "Analysis of Permissible State of Flying Capacitors Multilevel Inverter Switch," Power Electronics and Motion Control Conference (EPE/PEMC), 14th International, pp. T3-42-T3-45, 2010.
- [8] Bahravar, S.; Babaei, E.; Hosseini, S.H.; "New Cascade Multilevel Inverter Topology with Reduced Variety of Magnitudes of DC Voltage Sources," Power Electronics (IICPE), IEEE 5th India International Conference on, pp. 1-6, 2012.
- [9] Ranjan, Aalekh; Kumar, Krishna; Kumar, Lalit; "A Switched-Capacitors Based Multilevel Boost Inverter with Single Input Source," Power Electronics (IICPE), IEEE 5th India International Conference on, pp. 1-6, 2012
- [10] Chan, M.S.W; Chau, K.T.; "A New Switched-Capacitor Boost-Multilevel Inverter Using Partial Charging," IEEE, Transaction on, Vol. 54. No. 12, pp. 1145-1149, 2007.