



Inversores multinivel para aplicaciones de gran potencia. Estado del arte

Ivonne Yznaga
Boris Luis Corral
Ángel Costa

Recibido: Septiembre del 2004

Aprobado: Noviembre del 2004

Resumen / Abstract

Los convertidores clásicos de frecuencia contruidos a partir de inversores de dos niveles como fuentes de tensión o corriente presentan una serie de inconvenientes que provocan daños a la calidad de la energía, así como al comportamiento de los equipos eléctricos alimentados por estos, especialmente para aplicaciones de gran potencia. El convertidor multinivel es, hasta la fecha, la mejor alternativa para resolver estas dificultades. En el artículo se describen los principios fundamentales de operación de los principales tipos de convertidores multinivel y sus aplicaciones.

Palabras clave: multinivel, inversores, Clamped

The classical frequency converter made up from a two level voltage or current source inverter has several important drawbacks that injure the electrical system power quality and the behaviour of the electrical apparatus fed by them specially at high power applications. The multilevel converter is, up to date, the best choice for solving these problems. This paper describe the elementary principle of operation of the main types of multilevel converters and its applications.

Key words: multilevel, inverters, Clamped

INTRODUCCIÓN

En los últimos años los convertidores multinivel de potencia se han convertido en un gran atractivo en alta tensión, y están siendo utilizados en objetivos industriales tales como fuentes de corriente alterna (CA), compensadores estáticos de reactivos, sistemas de accionamiento etc.^{1,2} Los accionamientos eléctricos muy grandes requieren de una electrónica muy avanzada capaz de satisfacer la gran potencia demandada por estos sistemas (superior a un megawatt).

A consecuencia de la utilización de los convertidores de dos niveles con modulación de ancho de pulso (PWM) para accionamientos de velocidad variable, se han reportado toda una serie de inconvenientes.^{1,3}

Los accionamientos de velocidad variable habitualmente utilizan a la entrada un rectificador a diodos para convertir la tensión de CA de la línea en una tensión de corriente directa (CD), que luego mediante un inversor será transformado en una tensión de CA de frecuencia y amplitud variable. Los principales problemas debidos a la conmutación de alta frecuencia que se producen con el método PWM son: fallas en los rodamientos y deterioro del aislamiento de los enrollados por corrientes circulantes; sobretensiones y descargas por efecto corona.^{4,5} Estas corrientes circulantes son producto de las capacitancias entre las capas de enrollado, los conductores del enrollado y entre los conductores y la carcasa del motor.

En la actualidad, este fenómeno de las fallas de aislamiento en los motores controlados por sistemas de velocidad variable se ha comenzado a tener seriamente en consideración, ya que estas altas frecuencias de conmutación implican una altísima variación de la tensión en el tiempo (dU/dt) lo cual causa la inducción de las ya mencionadas corrientes circulantes. Teniendo en cuenta que los dispositivos semiconductores pueden transicionar desde un estado de cero volt a otro de 600 V incluso superior, se puede suponer que esto generará además, altos niveles de interferencia electromagnética. Otra desventaja a considerar en los dispositivos convencionales de velocidad variable es que sus pérdidas de conmutación son muy superiores a las de conducción y apagado debido nuevamente a su operación a muy alta frecuencia, lo que afecta la instalación.

Se puede resumir entonces que las principales desventajas del uso de inversores de velocidad variable convencionales son:

1. Sobretensiones y descargas por efecto corona en los motores.
2. Aparición de corrientes circulantes que provocan daños en los rodamientos y fallas del aislamiento de los motores.
3. Altas pérdidas en conmutación.
4. Interferencia electromagnética que afecta a equipos de comunicación cercanos u otros equipos electrónicos.

Existen en la actualidad, y se ha podido constatar en la literatura, tres topologías fundamentales para el diseño de inversores multinivel.

1. Diode-Clamped.
2. Flying-Capacitor.
3. En cascada con varias fuentes de CD.

DESCRIPCIÓN DE LAS TOPOLOGÍAS

Inversor multinivel diodo-Clamped

Con el inversor multinivel diodo Clamped^{3,6-9} se pueden sintetizar las formas de ondas deseadas a partir de los varios niveles de tensión de corriente directa. Su estructura singular, les permite manejar altas tensiones sin el uso de transformadores. Están provistos de una alta eficiencia debido a que la frecuencia fundamental de conmutación puede ser utilizada por los dispositivos individuales y son apropiados para accionamientos de motores de altos valores nominales (VA).

Este tipo de inversor utiliza capacitores en serie para dividir el bus de corriente directa en paquetes de niveles de tensiones. Para producir m niveles en la tensión de fase, el inversor multinivel con diodo Clamped necesita $m-1$ capacitores en el bus de CD.

Estos niveles se definen como el número de valores de potencial posibles a la salida del convertidor referido a un punto común.

Un ejemplo sencillo para analizar este tipo de inversor puede ser, el inversor trifásico de tres niveles (figura 1).

En este caso la tensión a través de los capacitores es igual entre ellos e iguales a $V_c/2$, (V_c es la tensión total del bus de directa aplicado). Este circuito de potencia cuenta con 12 interruptores semiconductores (S_{11} a S_{34}) y 6 diodos Clamped (D_{c11} a D_{c32}). Con esta configuración se puede aumentar hasta al doble la tensión total en el enlace de tensión continua y con ello se aumenta la tensión aplicada al motor. El funcionamiento de una de las fases del inversor es análogo a un interruptor de tres posiciones (figura 2).

Para explicar cómo se sintetiza la tensión, se consideró la carga conectada a entre el punto de referencia O y la fase U . Como es un inversor de tres niveles, pues habrán 3 combinaciones posibles para generar 3 niveles de tensión en la fase U . Según la magnitud de la tensión de referencia se distinguen estas tres condiciones lógicas, a cada una de las cuales corresponde un estado de conmutación distinto. Es válido aclarar que la forma de onda del voltaje de referencia es sinusoidal y las formas de ondas de las portadoras son triangulares y desfasadas 180° entre ellas.

- La tensión de referencia es mayor que la tensión de la onda portadora para el semiciclo positivo.

- Se debe aplicar tensión positiva a la carga.

$T_1 = \text{ON}, T_2 = \text{ON}, T_3 = \text{OFF}, T_4 = \text{OFF}.$

- La tensión de referencia es mayor que la tensión de la onda portadora para el semiciclo negativo, y menor que la tensión de la onda portadora para el semiciclo positivo.

- Se debe aplicar tensión cero a la carga.

- $T_1 = \text{OFF}, T_2 = \text{ON}, T_3 = \text{ON}, T_4 = \text{OFF}.$

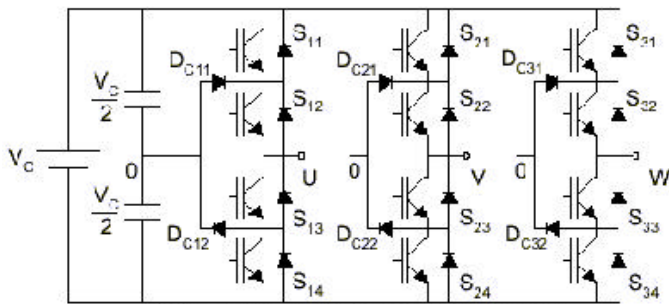
- La tensión de referencia es menor que la tensión de la onda portadora para el semiciclo negativo.

- Se debe aplicar tensión negativa a la carga.

- $T_1 = \text{OFF}, T_2 = \text{OFF}, T_3 = \text{ON}, T_4 = \text{ON}.$

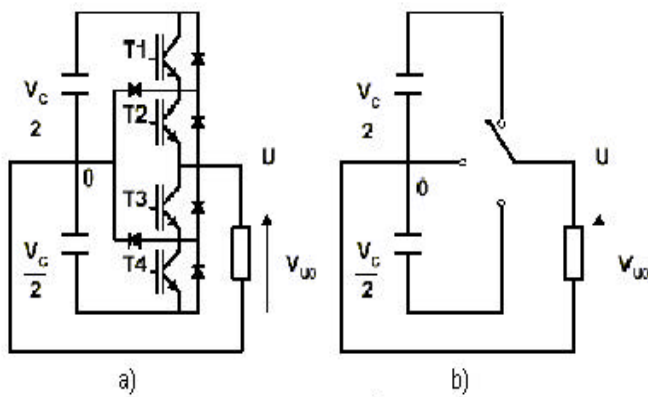
En la figura 3 puede observarse la tensión en la carga de una fase del inversor trifásico de tres niveles.

Otro ejemplo de este tipo de inversor es el inversor trifásico de cinco niveles (figura 4).

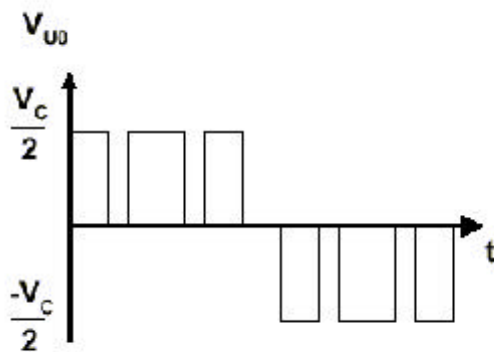


Inversor trifásico de tres niveles.

1

Fase del inversor trifásico de tres niveles:
a) Circuito de potencia; b) Interruptor equivalente.

2



Tensión en la carga de una fase del inversor trifásico de tres niveles.

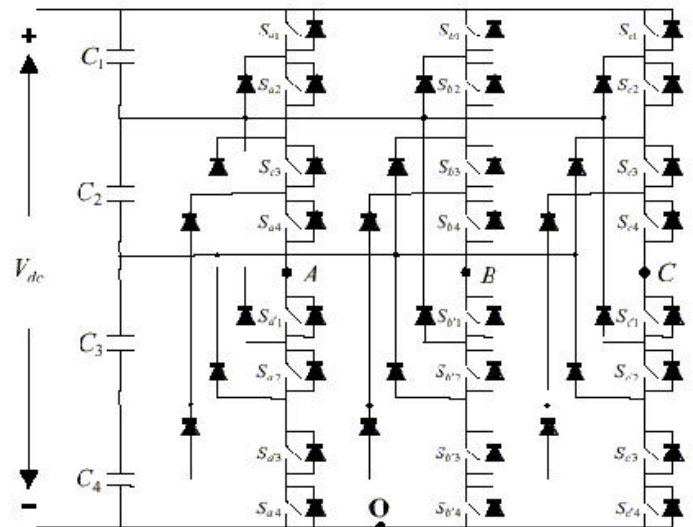
3

En este caso el inversor cuenta con 24 interruptores semiconductores, 18 diodos Clamped, 4 capacitores, la tensión a través de estos son iguales entre ellos e iguales a $E/4$. Por lo tanto, a medida que se aumenta el número de niveles en la tensión a la salida, mayor cantidad de componentes habrá que utilizar, por ejemplo, para generar cinco niveles, con respecto al

circuito de tres niveles, se aumentaron al doble todas las componentes con que cuenta el de tres niveles.

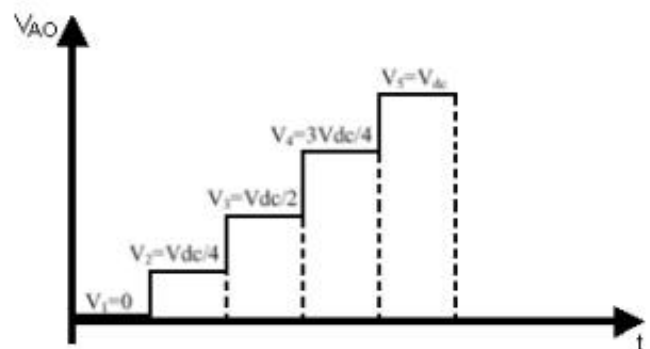
En la tabla 1 se muestra un ejemplo de secuencia para generar cinco niveles de la tensión de fase A, el estado 1 representa que el conmutador está activado o en conducción, y el estado 0 que el conmutador está desactivado o en no conducción. Para este ejemplo solo se obtienen niveles de tensiones positivos debido a la ubicación del punto de referencia, el punto O, dentro del circuito.

Otro ejemplo es el que se muestra en la figura 6.



inversor trifásico de cinco niveles.

4



forma de onda del voltaje para la fase A del inversor de cinco niveles.

5

Inversor multinivel Flying Capacitor

Este tipo de inversor multinivel⁹⁻¹³ utiliza una estructura escalonada de capacitores, donde la tensión a través de cada capacitor es de $V_{dc}/4$. Para generar m niveles en el voltaje de salida, se necesitan $m-1$ capacitores en el bus de directa. La estructura de una fase es

idéntica a las otras dos restantes. En la medida que la tensión se incrementa entre dos capacitores, determinará los niveles de tensión en la forma de onda de la tensión a la salida.

Un ejemplo de inversor multinivel Flying Capacitor, es el inversor trifásico de cinco niveles en la tensión a la salida (figura 7).

Como se muestra en la figura 7, los tres lazos internos de capacitores balanceados de la fase A (C_{a1} - C_{a3}) son independiente de los de la fase B, aunque todas las fases están alimentadas por los capacitores C_1 - C_4 .

Existen diferentes combinaciones para obtener los cinco niveles de tensión de salida para este tipo de inversor; en la tabla 2 se muestra una de esas posibles combinaciones, teniendo en cuenta que se obtendrán los niveles de tensión solo para la fase A, y además, los estados de estos interruptores semiconductores responden al mismo principio de funcionamiento explicado para la tabla 1, cuando se trató el tema del inversor multinivel diodo Clamped .

Inversor en cascada con varias fuentes de CD

Este tipo de inversor²⁻⁴ tiene como objetivo sintetizar la tensión deseado a partir de la superposición de varios niveles de tensiones de CD que pueden ser obtenidos ya sea de baterías, celdas solares o cualquier otro tipo de fuente de CD, es por esto que es muy recomendable el uso de esta estructura en sistemas de energía renovable y en vehículos eléctricos.

En la figura 8 se muestra el esquema para un inversor de este tipo con S fuentes. Como se puede apreciar el esquema consiste en S puentes en H con sus respectivas salidas conectadas en serie. En la figura 9 se muestra la forma de onda de la tensión a la salida para una fase en el caso de un inversor de 11 niveles.

De la figura se observa que se han obtenido 11 niveles de tensión a partir de la superposición de la salida de cinco puentes H . Se puede demostrar que en este caso el THD es inferior al 5%.¹¹ Con suficientes niveles y un algoritmo de conmutación adecuado se puede obtener una onda prácticamente sinusoidal.

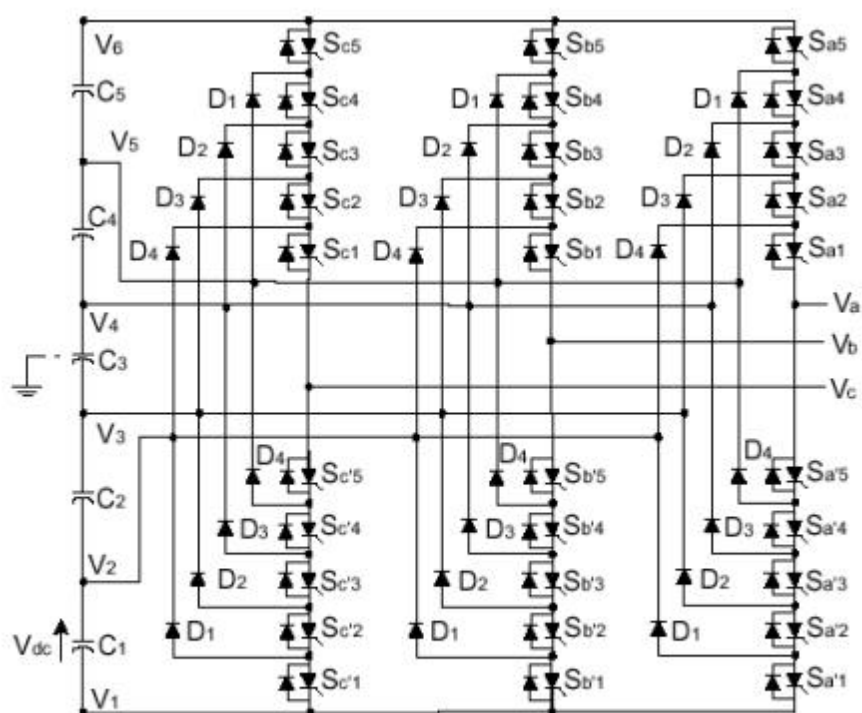
COMPARACIÓN ENTRE TOPOLOGÍAS

Todas las topologías descritas cumplen con el objetivo fundamental de aliviar los inconvenientes surgidos al utilizar los clásicos inversores de dos niveles en aplicaciones de gran potencia. En la tabla 3 se realiza una comparación entre las componentes de potencia necesarias para generar igual cantidad de niveles con las distintas estructuras. Los diodos Clamped solo son necesarios en uno solo de los tres tipos descritos, mientras que los diodos de balance solo son necesarios en la estructura Flying Capacitor.

Resulta fácil apreciar que se necesita menor cantidad de componentes en los del tipo cascada. Otras de las ventajas de este tipo de esquema son su estructura modular y que el número de niveles puede ser ajustado fácilmente agregando o eliminando celdas completas (puentes en H).

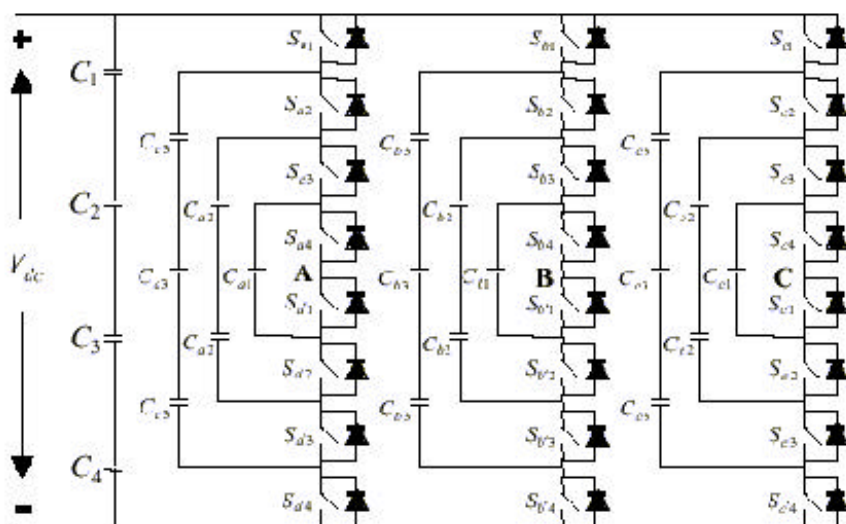
Tabla 1
Niveles de voltaje del inversor de cinco niveles y el estado de los conmutadores

Salida	Estado del conmutador							
	S_{a1}	S_{a2}	S_{a3}	S_{a4}	$S_{a'1}$	$S_{a'2}$	$S_{a'3}$	$S_{a'4}$
$V_5 = V_{dc}$	1	1	1	1	0	0	0	0
$V_4 = 3V_{dc}/4$	0	1	1	1	1	0	0	0
$V_3 = V_{dc}/2$	0	0	1	1	1	1	0	0
$V_2 = V_{dc}/4$	0	0	0	1	1	1	1	0
$V_1 = 0$	0	0	0	0	1	1	1	1



Inversores trifásicos de seis niveles.

6

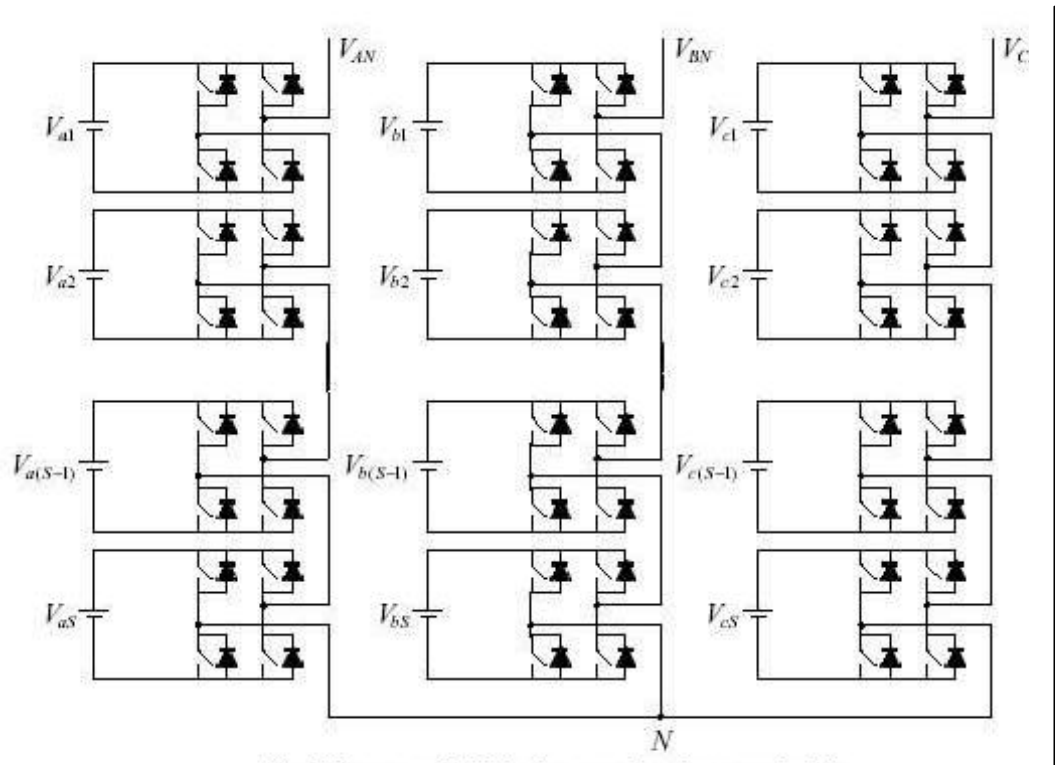


Inversor flying capacitor trifásico de cinco niveles.

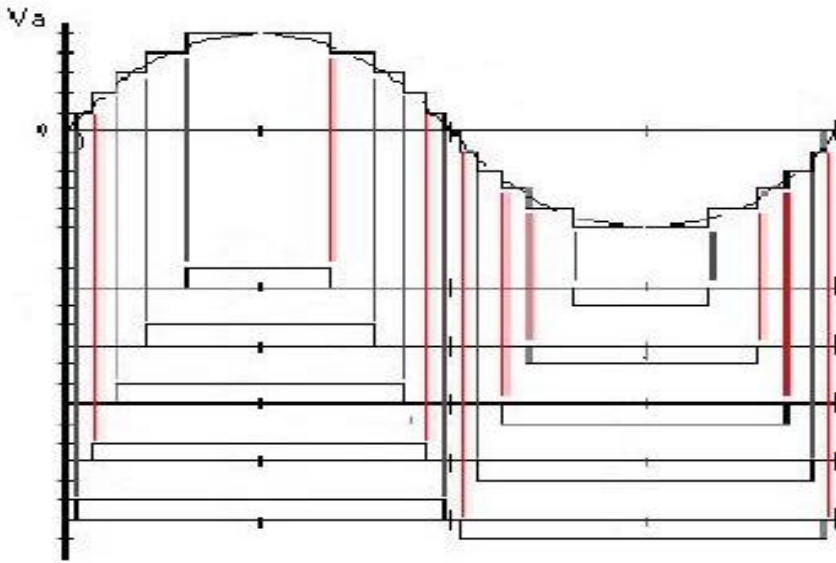
7

Tabla 2
Combinación para obtener cinco niveles a partir del inversor flying capacitor de cinco niveles

Salida V_{Ao}	Estado del conmutador							
	S_{a1}	S_{a2}	S_{am-1}	S_{am}	$S_{i'1}$	$S_{a'2}$	$S_{a'm-1}$	$S_{1'm}$
$V_5 = V_{dc}$	1	1	1	1	0	0	0	0
$V_4 = 3V_{dc}/4$	1	1	1	0	1	0	0	0
$V_3 = V_{dc}/2$	1	1	0	0	1	1	0	0
$V_2 = V_{dc}/4$	1	0	0	0	1	1	1	0
$V_1 = 0$	0	0	0	0	1	1	1	1



Inversores multinivel con varias fuentes de CD.



Forma de onda de una fase a la salida del inversor.

9

TABLA 3
Comparación del número de dispositivos necesarios en cada topología

Topología	Diodo-Clamped	Flying Capacitor	Cascada
Dispositivos de switcheo	2 (m-1)	2 (m-1)	2 (m-1)
Diodos libres camino	2 (m-1)	2 (m-1)	2 (m-1)
Diodos Clamped	(m-1) (m-2)	0	0
Capacitores de entrada	(m-1)	(m-1)	(m-1)/2
Capacitores de balance	0	(m-1) (m-2)/2	0

CONCLUSIONES

Se han descrito las principales topologías para inversores de varios niveles. Las múltiples ventajas del uso de este tipo de inversores en sustitución de los inversores clásicos de dos niveles son tales como:

- Posibilidad de acceder a tensiones mayores, lo cual hace posible su aplicación en accionamientos de gran potencia.
- Producen ondas de tensión a la salida mucho más sinusoidales, lo cual implica menores distorsiones de la corriente de la carga.
- Menores d_v/d_t y por lo tanto menores esfuerzos eléctricos en los semiconductores y menores niveles de interferencia electromagnética (EMI).

Se ha podido apreciar en la literatura, la importancia de los métodos de modulación y su influencia en el rendimiento de estos equipos.

REFERENCIAS

1. Rodríguez, José y César Silva: "Convertidores de 3 niveles: Una nueva alternativa para accionamientos de media tensión", Departamento de Electrónica, Universidad Técnica Federico Santa María, Viña del Mar, 21 al 23 de Abril de 1999.
2. Schibli, P. Nikolaus; Tung Nguyen and Alfred C. Ruffer: "A Three-Phase Multilevel Converter for High-Power Induction Motors", *IEEE Transactions on Power Electronics*, Vol. 13, No. 5, September, 1998.

3. ———: "Power Induction Motors", *IEEE Transactions on Power Electronics*, Vol. 13, No. 5, September, 1998,
4. Chen, Shaotang and Thomas Lipo: "Circulating Type Motor Bearing Current in Inverter Drives", *IEEE Industry Applications Magazine*, Vol. 4, No. 1, January/February, 1998.
5. Bonnet, Austin H.: "Available Insulation System for PWM Inverter-Fed Motors", *IEEE Industry Applications Magazine*, Vol. 4, No. 1, January/February, 1998.
6. Nabae, A.; I. Takahashi and H. Akagi: "A New Neutral-Point-Clamped PWM Inverter", *IEEE Trans. Industry Applications*, Vol. IA-17, No. 5, pp. 518-523, Sept., 1981,
7. Choi, N. S.; J. G. Cho and G. H. Cho: "A General Circuit Topology of Multilevel Inverter", *IEEE PESC*, pp. 96-103, 1991.
8. Bedford, B. D.: *Principles of Inverter Circuits*, John Wiley & Sons Inc. 1964.
9. Ohno, E.: "Introduction to Power Electronics," Oxford Science Publications, 1998.
10. Choi, N. S.; J. G. Cho and G. H. Cho: "A General Circuit Topology of Multilevel Inverter", *IEEE PESC*, pp. 96-103, 1991,
11. Tolbert, Leon M. and Thomas G. Habetler: "Novel Multilevel Inverter Carrier-Based PWM Methods".
12. Walker, Geoff and Gerard Ledwich: "Bandwidth Considerations for Multilevel Converters," *IEEE Transactions on Power Electronics*, Vol. 14, No. 1, January, 1999.
13. Chiasson, John; Leon Tolbert; Keith Mackenzie and Shong Du: *Eliminating Harmonics in a Multilevel Converters Using Resultant Theory*.
14. Sirisukprasert, Siriroj: "Optimized Harmonic Stepped-Waveform for Multilevel Inverter", Thesis Submitted to the Faculty of the Virginia Polytechnic Institute and State University, September 15, 1999.

AUTORES

Ivonne Yznaga Blanco

Ingeniera Electricista, Profesora Asistente, Centro de Investigaciones y Pruebas Electroenergéticas (CIPEL), Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría, Cujae, Ciudad de La Habana, Cuba

e-mail:ivonne@electrica.cujae.edu.cu

Boris Luis Corral Martínez

Ingeniero Electricista, CIPEL, Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría, Cujae, Ciudad de La Habana, Cuba

e-mail:borisl@electrica.cujae.edu.cu

Ángel Costa Montiel,

Ingeniero Electricista, Doctor en Ciencias Técnicas, Profesor Auxiliar, CIPEL, Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría, Cujae, Ciudad de La Habana, Cuba

e-mail:aacm@electrica.cujae.edu.cu

**REVISTAS CIENTÍFICAS
DE LA CUJAE
AHORA EN FORMATO ELECTRÓNICO
¡VISÍTENOS!**



• <http://intranet/ediciones/>