

DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN PROTOTIPO DE INVERSOR MULTINIVEL MONOFÁSICO EN CASCADA

David Sarzoza *) Jorge Mírez **)

*) Departamento de Eléctrica y Electrónica
Universidad de las Fuerzas Armadas, Latacunga, Ecuador.

e-mail: djsa18@yahoo.com

***) Facultad de Ciencias
Universidad Nacional de Ingeniería, Lima, Perú.
e-mail: jmirez@uni.edu.pe

R esumen

Los inversores multinivel pueden generar corrientes y/o voltajes sinusoidales con mucho menor contenido armónico. Si el número de niveles es lo suficientemente alto, se puede obtener un voltaje (o corriente) casi sinusoidal. Más aún, se puede modular en amplitud en vez de ancho de pulso (PWM) al voltaje, por lo que las pérdidas generadas por las armónicas de corriente pueden minimizarse. Dentro del contexto de utilizar los inversores multinivel para obtener un bajo contenido armónico, se diseñó y construyó un prototipo de inversor monofásico de 8 niveles para operar un motor de corriente alterna. Este inversor consta de tres puentes completos tipo H, con sus voltajes escalados, lo que permite obtener el número de niveles ya mencionado. El inversor diseñado es capaz de soportar corrientes de aproximadamente 2 A, con un voltaje de salida de 110 Vac, dando una potencia nominal de 220 W. Para llevar a cabo este proceso, se diseñó un sistema de potencia modular con inversores individuales aislados galvánicamente, con sus sistemas de control de encendido y fuentes de alimentación independientes.

Palabras Claves: *Inversor multinivel, armónicos, IGBT, control.*

A bstract

Multilevel converters, which can generate almost perfect currents, and sinusoidal voltages with better harmonics, if the number of levels is high enough; a voltage almost sinusoidal can be got. Even more it is possible to inflect in width instead of pulse width (PWM) to the voltage so the generated losses by the harmonic current can be minimized. Moreover, the switching frequency and the power level of the semiconductor are reduced considerably. In the context of using multilevel converters to get a low harmonic content, a monostatic converter prototype of eight levels was designed and built to operate an AC motor. This converter consists of three full bridges type H, with its scaled voltages; it allows getting the mentioned levels. The designed converter is able to endure currents of approximately of 2A, with an output voltage of 110 Vac, giving a nominal power of 220 W. A modular power system with individual converters galvanically isolated was designed to achieve this process, with its control systems of ignition and independent power supply.

Keywords: *multilevel inverter, harmonics, IGBT, control.*

Fecha de recepción: 30/08/2016

Fecha de aceptación: 15/05/2017

INTRODUCCIÓN

La función principal de un Inversor es cambiar un voltaje de entrada de corriente

continua a un voltaje de salida de corriente alterna con la magnitud y la frecuencia deseada por el usuario, por lo que este tipo de equipos tiene amplia aplicación desde pequeñas fuentes de alimentación para computadoras, pasando por

aplicaciones automotrices hasta grandes aplicaciones industriales de potencia (1). Los inversores producen un voltaje o una corriente de salida cuyos niveles son 0, + Vdc y - Vdc (2). Estos inversores con fuente de voltaje son conocidos como inversores de tres niveles. Para obtener la forma de onda de voltaje o corriente con un mínimo de armónicos se requiere una conmutación en alta frecuencia, junto con diversas modulaciones por ancho de pulso (3).

En el campo de la electrónica de potencia los inversores multinivel han atraído mucho interés porque presentan un conjunto nuevo de propiedades adecuadas que sirve para usarse en compensación de potencia reactiva (4). Es por esto que, al aumentar la cantidad de niveles de voltaje en el inversor multinivel sin cambiar mayores especificaciones nominales de los dispositivos individuales, se puede aumentar la potencia nominal (5). La función general de este inversor multinivel es sintetizar un determinado voltaje a partir de varias fuentes separadas de corriente continua que pueden ser baterías, celdas de combustible o celdas solares (6). Los inversores multinivel son también un tema de estudio en los países de la región como se reporta en (7) y (8) que reportan una mínima distorsión armónica con señal sinusoidal casi perfecta. Por lo tanto siendo un tema bastante interesante y con mucha perspectiva de múltiples aplicaciones a futuro y con el adecuado uso de microcontroladores (9) es que se ha diseñado y construido un inversor multinivel monofásico.

RESULTADOS

Los criterios de diseño del inversor son del tipo multinivel en cascada, de tres etapas, monofásico, de carga inductiva, con tipo de alimentación asimétrica, con tres fuentes de entrada, con ocho niveles de tensión, con modulación de pulso único, con conmutadores IGBT y de salida aproximadamente de onda sinusoidal.

Los parámetros de diseño de la etapa de potencia son de 110 Vrms de voltaje de carga, 200 W, 60 Hz y lograr el esquema de conexiones de la Figura 1.

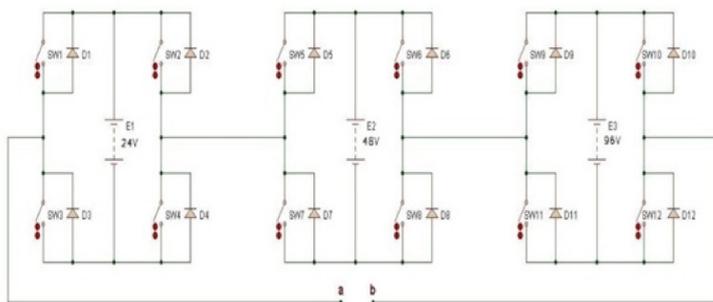


Figura 1. Esquema de conexiones

Para el diseño de las fuentes de alimentación se ha considerado un voltaje pico de 168 V que dividido entre $\sqrt{2}$ resulta 118.79 Vrms, valor cercano al parámetro de diseño de 110 Vrms. Para las diferentes etapas se hizo una selección de fuentes de alimentación que son mostrados en la Tabla 1, cada fuente de alimentación tiene 6 A de capacidad para compensar el arranque del motor.

Etapa	Valor Nominal de Salida	Voltaje de Alimentación
I	24 Vdc 6 A	110 V – 220 V
II	48 Vdc 6 A	110 V – 220 V
III	96 Vdc 6 A	110 V – 220 V

Tabla 1. Selección de fuentes de Alimentación

La utilización del IGBT se justifica por las características de robustez y velocidad de respuesta. El inversor multinivel posee doce IGBT's FGA40N65SMD, los cuales son del tipo potencia con corriente de arranque de 6 A, 168 Vmaxdc, 60 Hz de frecuencia de conmutación, con carga máxima de carga de 2 A y que cumple con los criterios de diseño del inversor.

En el diseño de la etapa de control se ha considerado calcular los ángulos de disparo de los IGBT, así mismo, se ha realizado la programación de los pulsos que el microcontrolador debe entregar para el funcionamiento adecuado del inversor multinivel.

El contenido armónico de un sistema que posee inversores tipo puente completo en cascada se reduce de manera considerable solo por el hecho de incrementar las etapas, proceso que incluso permite obtener mayor voltaje de salida.

Cálculo del TDH, Ángulos y Tiempos de Disparo.

Con las ecuaciones 1, 2 y 3 se ha calculado del TDH del inversor en donde α y t_d están en función de los ángulos de disparo.

$$(1) \quad TDH = \sqrt{\frac{E_i^2 - E_1^2}{E_1^2}} \times 100$$

$$(2) \quad E_1^2 = \frac{8E^2}{49\pi^2} [\cos(\alpha_1) + \cos(\alpha_2) + \cos(\alpha_3) + \cos(\alpha_4) + \cos(\alpha_5) + \cos(\alpha_6) + \cos(\alpha_7)]$$

$$(3) \quad E_i^2 = \frac{2E^2}{49\pi^2} \left[\frac{49\pi}{2} - \alpha_1 - 3\alpha_2 - 5\alpha_3 - 7\alpha_4 - 9\alpha_5 - 11\alpha_6 - 13\alpha_7 \right]$$

La Tabla 2 muestra los ángulos de disparo obtenidos al igualar a cero las ecuaciones 2 y 3; lográndose un TDH igual a 7.94%, tiempos de disparo de los IGBT's mostrados en la Tabla 3 lográndose una forma de onda de voltaje de salida del inversor monofásico multinivel de tres etapas conectadas en cascada mediante las señales de control.

Ángulo	α_1	α_2	α_3	α_4	α_5	α_6	α_7
°	8.57	10.08	25.72	31.56	42.85	49.92	66.01
t_d [ms]	0.397	0.466	1.190	1.461	1.983	2.310	3.054

Tabla 2. Ángulos y Tiempos de Disparo (td)

Tiempo (µs)	IGBT											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
$t_1=400$	0	0	1	1	0	0	1	1	0	0	1	1
$t_2=70$	1	0	0	1	0	0	1	1	0	0	1	1
$t_3=720$	0	0	1	1	1	0	0	1	0	0	1	1
$t_4=270$	1	0	0	1	1	0	0	1	0	0	1	1
$t_5=520$	0	0	1	1	0	0	1	1	1	0	0	1
$t_6=330$	1	0	0	1	0	0	1	1	1	0	0	1
$t_7=740$	0	0	1	1	1	0	0	1	1	0	0	1
$t_8=2230$	1	0	0	1	1	0	0	1	1	0	0	1
$t_9=740$	0	0	1	1	1	0	0	1	1	0	0	1
$t_{10}=330$	1	0	0	1	0	0	1	1	1	0	0	1
$t_{11}=520$	0	0	1	1	0	0	1	1	1	0	0	1
$t_{12}=270$	1	0	0	1	1	0	0	1	0	0	1	1
$t_{13}=720$	0	0	1	1	1	0	0	1	0	0	1	1
$t_{14}=70$	1	0	0	1	0	0	1	1	0	0	1	1
$t_{15}=400$	0	0	1	1	0	0	1	1	0	0	1	1
$t_{16}=400$	0	0	1	1	0	0	1	1	0	0	1	1
$t_{17}=70$	0	1	1	0	0	0	1	1	0	0	1	1
$t_{18}=720$	0	0	1	1	0	1	1	0	0	0	1	1
$t_{19}=270$	0	1	1	0	0	1	1	0	0	0	1	1
$t_{20}=520$	0	0	1	1	0	0	1	1	0	1	1	0
$t_{21}=330$	0	1	1	0	0	0	1	1	0	1	1	0
$t_{22}=740$	0	0	1	1	0	1	1	0	0	1	1	0
$t_{23}=2240$	0	1	1	0	0	1	1	0	0	1	1	0
$t_{24}=740$	0	0	1	1	0	1	1	0	0	1	1	0
$t_{25}=330$	0	1	1	0	0	0	1	1	0	1	1	0
$t_{26}=520$	0	1	1	0	0	0	1	1	0	1	1	0
$t_{27}=270$	0	1	1	0	0	1	1	0	0	0	1	1
$t_{28}=720$	0	0	1	1	0	1	1	0	0	0	1	1
$t_{29}=70$	0	1	1	0	0	0	1	1	0	0	1	1
$t_{30}=400$	0	0	1	1	0	0	1	1	0	0	1	1

Tabla 3. Tiempos de activación de cada IGBT's

El microcontrolador seleccionado fue el ATMEGA164P con 12 salidas por IGBT, 1 salida para un PED, temporizador, frecuencia, señal de reloj, espacio de memoria, y; en puertos digitales con interrupción: 1 salida para switch on/off, 1 salida para pulsador de arranque.

Un solo modelo de placa (ver Figura 2 y 3) fue necesario para las tres etapas dado que son el mismo circuito y funcionalidad, por lo que utilizando las borneras de acople tipo tornillo se unirán las fuentes de alimentación con las GATES de cada uno los IGBT's y que permite recibir mejor la señal del dispositivo de la placa de control.

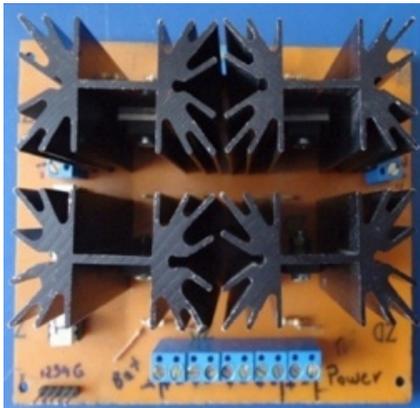


Figura 2. Tarjeta de potencia.

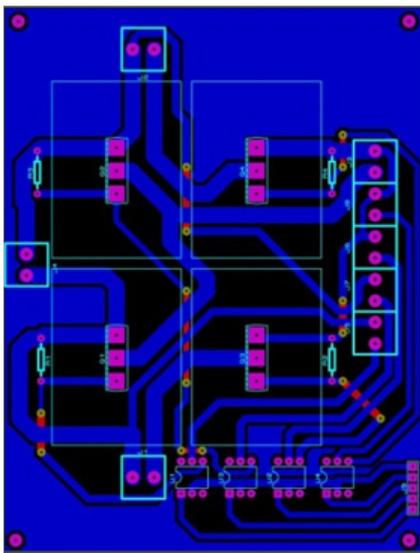


Figura 3. Placa del circuito de la etapa de potencia

La Figura 4 muestra el diagrama eléctrico de conexiones de la etapa de control.

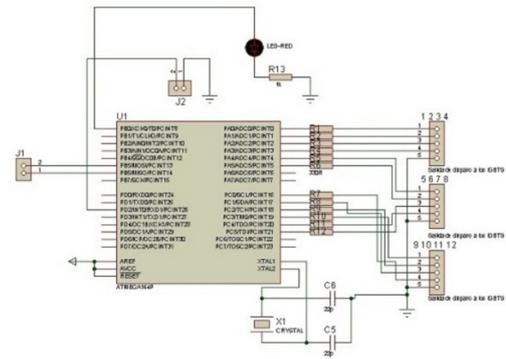


Figura 4. Diagrama eléctrico de la etapa de control.

La integración de las etapas de control y de potencia se realizó con conductor AWG N° 20 para enviar las señales de control a cada uno de los IGBT's. La Figura 5 muestra el prototipo final del inversor con acabados para el uso didáctico del mismo en el laboratorio.



Figura 5. Módulo final del inversor multi-nivel didáctico monofásico en cascada.

Las pruebas de laboratorio fueron realizadas tomando en cuenta los valores de diseño del inversor y los datos fueron obtenidos desde el módulo de adquisición de datos LV DAM ES. La forma de onda real obtenida se aprecia en la Figura 6 y la Fig. 7 muestra que el valor TDH real es 7.9 %, lo cual es menor al calcu-

lado cumpliendo así de manera correcta el diseño para el TDH y en la Tabla 4 se muestra el valor medido de los ángulos de disparo de cada nivel.

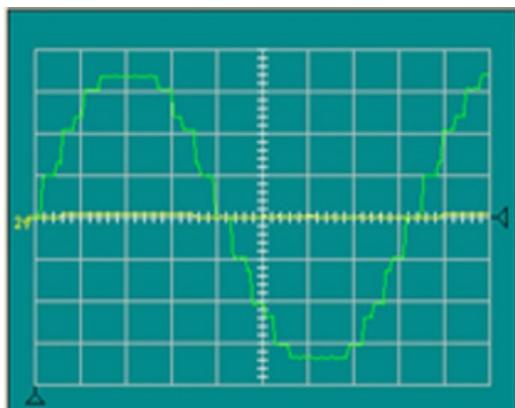


Figura 6. Forma de onda generada real

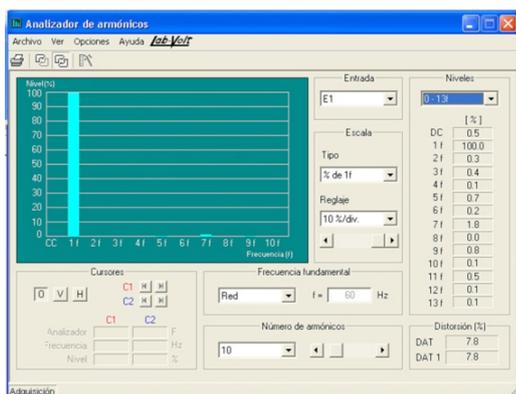


Figura 7. Valor real del TDH.

Valor ideal	Valor real	Error (%)
0.397	0.40	0.75
0.466	0.47	0.85
1.190	1.20	0.83
1.461	1.47	0.61
1.983	2.00	0.85
2.310	2.33	0.85
3.054	3.07	0.50

Tabla 4. Valor ideal, valor real y error de tiempo de disparo de cada nivel.

La Tabla 5 muestra los resultados de las pruebas de laboratorio obtenidas conectando un motor a la salida del inversor multinivel. Los resultados obtenidos son los esperados en el diseño para 110 Vrms y corriente menor a 2.5 A.

Carga Resistiva en el Generador (A)	Salida Motor	
	Voltaje [V]	Corriente [A]
0	110	2
0.1	110	2
0.2	110	2
0.3	110	2
0.4	110	2
0.5	110	2
0.6	110	2.1
0.7	110	2.1
0.8	110	2.1
0.9	110	2.1
1.0	110	2.2
1.1	110	2.2
1.2	110	2.2
1.3	110	2.2
1.4	110	2.2
2.1	110	2.2
2.8	110	2.2
3.5	110	2.3
4.1	110	2.3

Tabla 5. Voltaje y Corriente a salida de motor.

CONCLUSIONES

Un inversor multinivel monofásico de tres etapas ha sido diseñado y construido usando 12 IGBT's y el microcontrolador ATMEGA164P con lo cual se ha logrado un valor de TDH igual a 7.9 %. El inversor multinivel ha sido implementado en un módulo funcional, didáctico y práctico para su estudio, de estructura compacta y robusta. Los opto acopladores permiten separar y aislar las tierras entre el circuito de control y el circuito de potencia del inversor multinivel para proteger la parte de control en caso

de presentarse problemas con la respuesta del sistema en la parte de potencia del inversor.

Los inversores multinivel construidos a partir de puente "H" conectados en cascada permiten en pocas etapas, muchos niveles de tensión. El inversor construido tiene 3 etapas del que se obtuvo 8 niveles.

Las pruebas de laboratorio concluyen que el inversor multinivel cumple con los parámetros de diseño predeterminados y además se comprueba las buenas propiedades de la tecnología de inversores multinivel.

R eferencias

- (1) Hart, D. (2001). *Introducción a la Electrónica de Potencia*. Primera edición.
- (2) Benavent. (2001). *Electrónica de Potencia, Teoría y Aplicaciones*.
- (3) Ross, J. (1997). *The Essence of Power Electronics*.
- (4) Rashid, M. (2004). *Electrónica de Potencia: Circuitos, Dispositivos y Aplicaciones*. Tercera edición.
- (5) Mohan, N. (2009). *Electrónica de Potencia*. Tercera Edición.
- (6) Gonzáles, M. O. (2006). *Estudio de un Inversor Monofásico basado en Inversores Puente Completo conectados en Cascada para la realización de un Compensador Sincrónico Estático (STAT-COM)*". Tesis de Pregrado. Escuela de Ingeniería Eléctrica. Pontificia Universidad Católica de Valparaíso. Valparaíso, Chile.
- (7) Grisales, L. A. (2010). *Diseño e Implementación de un Inversor Trifásico Multinivel con fijación de Diodos*. Tesis para optar el Grado de Maestría en Ingeniería Eléctrica. Universidad Tecnológica de Pereira.
- (8) Bretón, A. (2003) "Diseño y Construcción de un Inversor Trifásico Multinivel". Tesis de Pregrado. Escuela de Ingeniería. Pontificia Universidad Católica de Chile. Santiago de Chile, Chile.
- (9) Angulo U. M. (2003). *Microcontroladores PIC. Diseño Práctico de Aplicaciones*", Tercera edición.