

PROTOTIPO DE INVERSOR MULTINIVEL MONOFÁSICO EN CASCADA

PROTOTYPE INVERTER SINGLE-PHASE MULTILEVEL IN CASCADE

David de Jesús Sarzosa Ante ¹
¹ *Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE*
Unidad de Gestión de Tecnologías - ESPE
Quijano y Ordóñez S/N y Hermanas Páez
Email: sadaavid@espe.edu.ec

Revista Energía Mecánica Innovación y Futuro, V Edición 2016, No. 12 (15)

RESUMEN

Se expone y prueba el diseño, construcción, e implementación de un inversor multinivel monofásico en cascada. El cual tiene la finalidad de generar corriente alterna a partir de fuentes de corriente continua con valores a la salida del inversor de 120Vac y 2A.

La obtención de la corriente alterna se realiza mediante la conmutación de los IGBT's generando así una señal casi sinusoidal a la salida del inversor.

Palabras Clave:

Inversor multinivel, prototipo, armónicos, igbt, etapa de control, etapa de potencia.

Abstract

This paper presents the design, construction and implementation of an inverter single-phase multilevel in cascade. Which has the purpose of generating alternating current from current sources continues with values to the exit of the investor of 120Vac and 2A. The obtaining of the alternating current from by means of the commutation of the IGBT's generating this way an almost sinusoidal sign to the exit of the inverter.

Keywords:

Armonics, igbt, multilevel converters, prototype, stage control, stage power.

1. INTRODUCCIÓN

Los inversores multinivel son inversores de última tecnología que pueden generar corrientes o incluso voltajes sinusoidales con mucho menor contenido armónico. [1] 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 minimizar. [4] Además, la frecuencia de conmutación y el nivel de potencia de los semiconductores se reducen considerablemente. 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.

La investigación se basa en un inversor multinivel en cascada que consiste en una serie de unidades inversoras de medio puente (monofásicas, puente completo). [5]. La función general de este inversor multinivel es sintetizar un determinado voltaje a partir de varias fuentes separadas de cd (SDCS, de several separate dc sources), que pueden ser baterías, celdas de combustible o celdas solares. [2]

2. MATERIALES Y MÉTODOS

Requerimientos para la implementación del inversor monofásico.

En la tabla 1 se indica las características de diseño que se tomó en cuenta para el inversor multinivel.

Tabla 1: Características de diseño seleccionado.

| CARACTERÍSTICAS DE DISEÑO DEL INVERSOR SELECCIONADO | |
|---|------------------------|
| PARÁMETRO | ELECCIÓN |
| Tipo | Multinivel en cascada |
| Etapas | 3 |
| Fase | Monofásico |
| Carga | Inductiva |
| Tipo de alimentación | Asimétrica |
| # Fuentes de entrada | 3 |
| Niveles de tensión | 8 |
| Modulación | Pulso Único |
| Conmutadores | IGBT |
| Salida | Aprox. onda sinusoidal |

Etapas de potencia

Para la etapa de potencia del inversor monofásico multinivel de tres etapas

conectadas en cascada planteado en la investigación, existen varios parámetros iniciales a considerar:

Parámetros para la etapa de potencia

Para la etapa de potencia del inversor monofásico multinivel de tres etapas conectadas en cascada los parámetros de diseño están dados por los valores nominales de la carga. En tabla 2 se detallan los parámetros de diseño.

Tabla 2: Parámetros de Diseño de la Etapa de potencia.

| PARÁMETROS DE DISEÑO | |
|----------------------|---------------|
| PARÁMETRO | VALOR NOMINAL |
| Voltaje Carga | 110 VRMS |
| Potencia | 200 Watts |
| Frecuencia | 60Hz |

Selección de fuente de alimentación

El requerimiento de las fuentes se basa en el tipo de alimentación asimétrica y en la corriente de salida que es de 2 A.

Para la selección de las fuentes de alimentación se debe tomar en cuenta los parámetros de diseño, por lo que el voltaje necesario es de 120Vrms, en donde el voltaje de la onda no es sinusoidal, por lo que esta es solo una aproximación, el diseño de las fuentes de alimentación se tomó en cuenta el valor del voltaje pico de 168V, este valor pico será dividido para $\sqrt{2}$ entonces:

$$V_{rms} = \frac{V_{m\acute{a}x}}{\sqrt{2}} \quad Ec. 1$$

$$V = 168 \frac{V}{\sqrt{2}} = 118.79$$

Esto se realiza por que la señal es casi sinusoidal.

En la tabla 3 se indica las fuentes de alimentación utilizadas, con una corriente de 6A, esta corriente nos ayudará en el arranque del motor por que la corriente arranque es 5 – 6 veces la corriente nominal. Los valores necesarios para la selección de las fuentes se detallan a continuación.

Tabla 3: Selección de Fuentes de Alimentación.

| ALIMENTACIÓN | | |
|--------------|-------------------------|-------------------------|
| ETAPA | VALOR NOMINAL DE SALIDA | VOLTAJE DE ALIMENTACIÓN |
| I | 24 VDC 6 A | 110V-220V |
| II | 48 VDC 6 A | 110V-220V |
| III | 96 VDC 6A | 110V-220V |

Selección del dispositivo de potencia

En la figura 1, se indica el esquema de conexiones utilizado para el desarrollo de la selección del dispositivo de potencia.

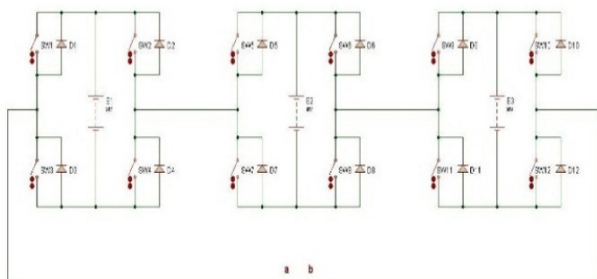


Figura 1. Inversor monofásico multinivel de tres etapas conectado en cascada.

La utilización del IGBT como dispositivo de potencia en el proyecto se justifica en base a las características de robustez y velocidad de respuesta, la corriente que se desea que circule por cada IGBT es de 2A, a continuación, en la tabla 4 se detalla los requerimientos para la selección del dispositivo de potencia.

REQUERIMIENTOS PARA EL DISPOSITIVO DE POTENCIA

| DISPOSITIVO | REQUERIMIENTO |
|-------------|----------------------------------|
| IGBT | IGBT A UTILIZAR: 12 |
| | larranque: 6 A |
| | V: 168 Vmaxdc |
| | FRECUENCIA DE CONMUTACIÓN: 60 HZ |
| | TIPO: DE POTENCIA |

Los parámetros técnicos específicos del dispositivo se muestran a continuación.

$$I_{\text{máx por IGBT}} = I_{\text{máx carga}}$$

$$I_{\text{máx carga}} = 2A$$

$$\sum \text{Fuentes de alimentación Inversor} = 168 \text{ Vdc.}$$

Basado en los parámetros de corriente y voltaje de diseño máximos se procedió a validar las capacidades del IGBT seleccionado FGA40N65SMD, que cumple las condiciones necesarias para el funcionamiento del inversor.

Diseño de la etapa de control

Antes de la selección del dispositivo de control se detallará las señales que este entregará para el funcionamiento del inversor multinivel, es por esto que un parámetro de diseño del inversor multinivel es minimizar la distorsión armónica, para aquello se calculará los ángulos de disparo, otro parámetro de diseño de esta etapa de control es los pulsos que el microcontrolador debe entregar al inversor multinivel para su funcionamiento.

Selección del ángulo de disparo para minimizar la distorsión armónica.

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

$$TDH = \sqrt{\frac{E_i^2 - E_1^2}{E_1^2}} \cdot 100 \quad Ec. 2$$

La relación de las armónicas existentes está dada en función de los ángulos posibles de la siguiente forma.

$$E_1^2 = \frac{8E^2}{49\pi^2} [Cos(\alpha 1) + Cos(\alpha 2) + Cos(\alpha 3) + Cos(\alpha 4) + Cos(\alpha 5) + Cos(\alpha 6) + Cos(\alpha 7)] \quad Ec. 3$$

$$E_i^2 = \frac{2E^2}{49\pi^2} \left[\frac{49\pi}{2} - 1\alpha 1 - 3\alpha 2 - 5\alpha 3 - 7\alpha 4 - 9\alpha 5 - 11\alpha 6 - 13\alpha 7 \right] \quad Ec. 4$$

En la tabla 5 se indica los ángulos obtenidos luego de igualar a cero cada una de las ecuaciones son los siguientes:

Tabla 5. Ángulos

| $\alpha 1$ | $\alpha 2$ | $\alpha 3$ | $\alpha 4$ | $\alpha 5$ | $\alpha 6$ | $\alpha 7$ |
|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| 8.57° | 10.08 | 25.72° | 31.56° | 42.85° | 49.92° | 66.01° |
| 0.397 | 0.466 | 1.190 | 1.461 | 1.983 | 2.310 | 3.054 |
| (ms) | (ms) | (ms) | (ms) | (ms) | (ms) | (ms) |

Entonces el TDH obtenido al reemplazar en la ecuación 1 es:

$$TDH = 7.94\%$$

Basado en los datos anteriores para el diseño del inversor multinivel, se requiere que el microcontrolador opere de la siguiente manera, es por esto que se indicará los pulsos y su manera de activación. En la figura 2 se indica los pulsos de cada uno de los IGBT's con su forma de onda ideal.

La forma de onda ideal de voltaje de salida del inversor monofásico multinivel de tres etapas conectadas en cascada mediante las señales de control se muestra en la figura 2.

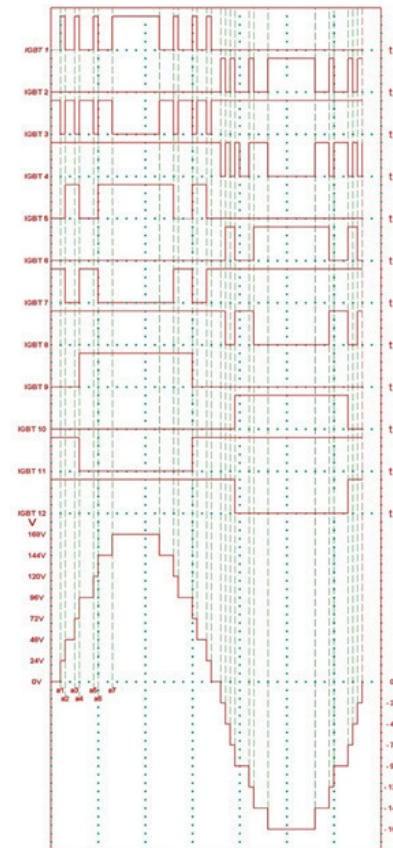


Figura 2 Forma de Onda Ideal con los Pulsos de cada IGBT

Selección del microcontrolador

A continuación, en la tabla 6 se citará los requerimientos y la justificación del microcontrolador seleccionado.

Tabla 6: Requerimientos para el microcontrolador.

| REQUERIMIENTOS PARA EL MICROCONTROLADOR | |
|---|--|
| DISPOSITIVO | REQUERIMIENTO |
| | PUERTOS DIGITALES DE SALIDA: |
| | 12 SALIDAS POR IGBT |
| | 1 SALIDA PARA UN LED |
| | TEMPORIZADOR |
| | FRECUENCIA |
| CONTROLADOR | SEÑAL DE RELOG |
| | ESPACIO DE MEMORIA |
| | Puertos digitales con interrupción: 1 Salida para switch on/off, |
| | 1 Salida para pulsador arranque |

Implementación de la etapa de potencia

Para la elaboración de las placas figura 3, se realiza un modelo puesto que los dos restantes son iguales, tiene el mismo circuito y funcionalidad cambiando nada más sus conexiones entre sí.

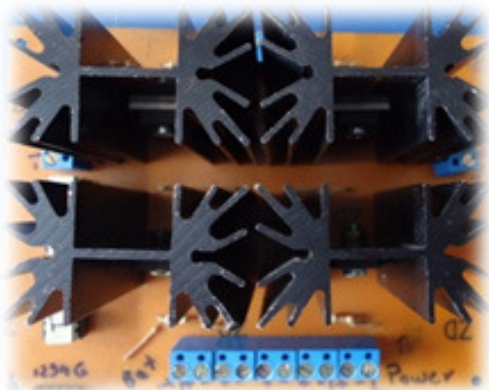


Figura 3. Tarjeta de potencia

Implementación de la etapa de control

En la figura 4 se muestra el diagrama eléctrico de conexiones de la etapa de control del inversor multinivel monofásico.

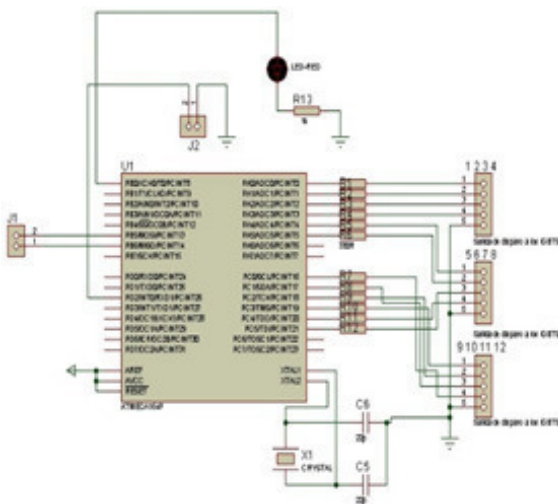


Figura 4. Figura 4: Diagrama eléctrico de la etapa de control.

Para la integración de la etapa de control con la etapa de potencia se realizó con el conductor AWG número 20, esto permite estar comunicados y así enviar los pulsos de la placa de control a cada uno de los IGBT's implementados en las placas de potencia.

En la figura 5 se observa el resultado del módulo final del prototipo didáctico de inversor multinivel monofásico en cascada.



Figura 5. Módulo final del Inversor Multinivel Didáctico Monofásico en Cascada

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Se analizó los resultados obtenidos durante el proceso de desarrollo de la investigación enfocando dicho análisis a pruebas sobre los dispositivos implementados.

Pruebas del inversor

Las pruebas fueron realizadas tomando en cuenta los valores ideales del inversor multinivel. En la tabla 7 de muestra los valores ideales del inversor.

Tabla 7: Valores ideales del inversor.

| VALORES IDEALES DEL INVERSOR | |
|------------------------------|---------------|
| PARÁMETRO | VALOR NOMINAL |
| Voltaje Carga | 110 VRMS |
| Corriente Carga | 2 A |
| Frecuencia | 60Hz |
| Carga | Monofásica |

A. Forma de onda ideal y real del inversor

Tomando en cuenta el prototipo realizado y llevándolo a simulación, en la figura 6, se generó el tipo de onda, esta onda es la ideal generada.

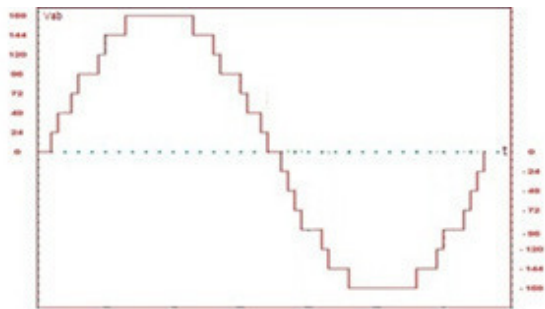


Figura 6. Forma de onda ideal generada

La forma de onda generada en el prototipo se indica en la figura 7, cumpliendo así con los niveles, tiempos y corrientes antes mencionadas para su diseño.

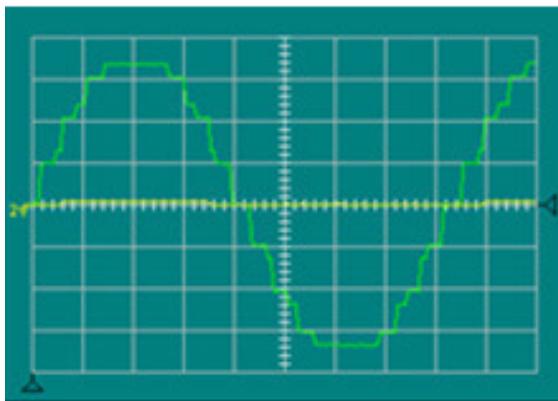


Figura 7. Forma de onda real generada

Resultado de distorsión armónica total (tdh) adquirido por el módulo de adquisición de datos (lv dam ems)

En la figura 8 se observa que el valor TDH obtenido en forma práctica del módulo de adquisición de datos (LV DAM ES), es menor al calculado, cumpliendo así de manera correcta el diseño para el TDH.

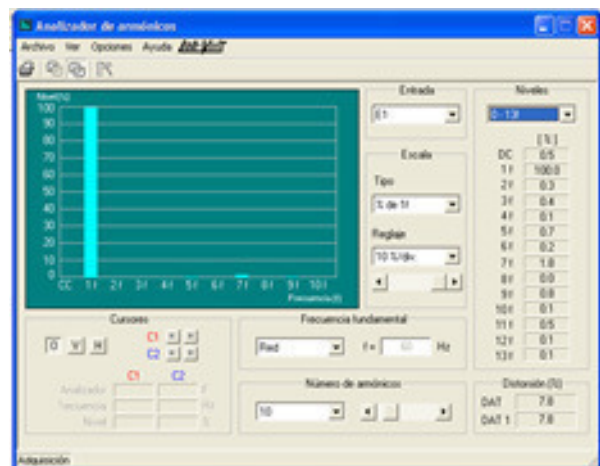


Figura 8: Valor obtenido en la práctica del TDH.

El valor obtenido en esta práctica es de 7.9%, esto significa que el valor corresponde al calculado.

Resultado de los ángulos de disparo de cada nivel adquirido por el módulo de adquisición de datos (lv dam ems).

En la tabla 8 se indica los valores obtenidos en el diseño y en la práctica en milisegundos (ms), para su respectiva comparación de resultados.

Tabla 8. Valores para el TDH obtenidos de forma práctica

| VALOR CALCULADO | VALOR OBTENIDO | 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 |

Los valores que se detallan en la tabla 8, se pueden apreciar de manera ilustrativa en la figura 9.

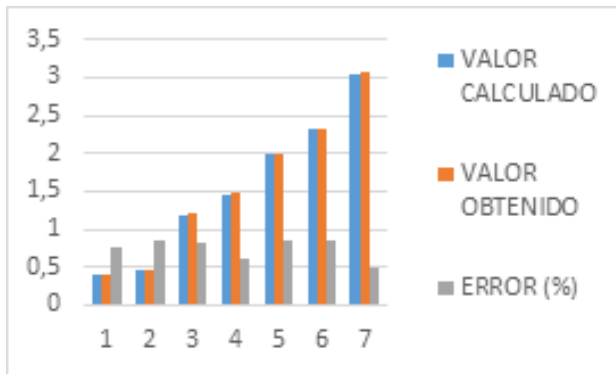


Figura 9: Verificación de los valores calculados y obtenidos en la práctica.

Los valores obtenidos en esta práctica están dentro del margen del error, lo que quiere decir que lo diseñado a lo obtenido se cumplió satisfactoriamente.

Resultados de las pruebas de laboratorio.

En la tabla 9 se muestra los valores obtenidos en las pruebas de laboratorio, se realizó con la ayuda de un motor, los valores representados son a la salida del generador conectado a este un módulo de cargas resistivas (figura 10).

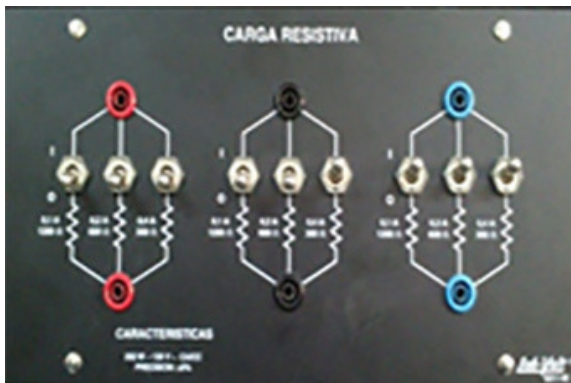


Figura 10: Módulo real de cargas resistivas
A continuación, se presenta los valores obtenidos en la prueba de laboratorio.

Tabla 9: Valores obtenidos en la prueba de laboratorio.

| 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 |

Los valores que se detallan en la tabla 9, se pueden apreciar de manera ilustrativa en la figura 11.

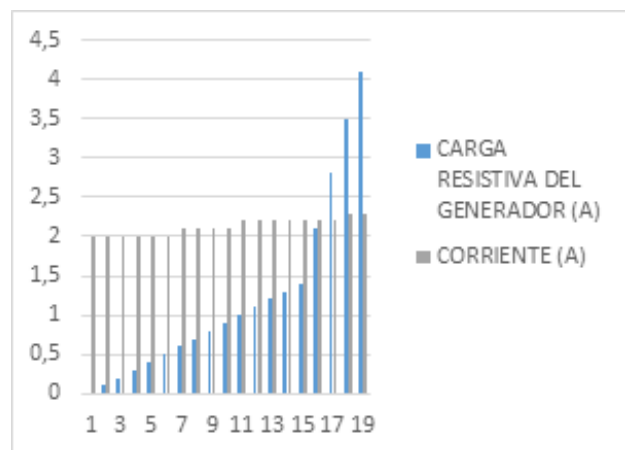


Figura 11: Verificación de los valores en la prueba de laboratorio.

ENERGÍA MECÁNICA INNOVACIÓN Y FUTURO
No. 5 Vol. 1 / 2016 (15) ISSN 1390 - 7395 (12/15)

En esta experimentación se obtuvo los valores esperados en la parte de diseño, con un voltaje de 110V y una corriente menor a 2.5A.

Cabe recalcar que para la suma de la carga resistiva se debe subir cada uno de los interruptores del módulo de carga resistiva según corresponda por obtener los valores establecidos en dicha práctica.

4. CONCLUSIONES

- Se investigó la utilidad del inversor multinivel monofásico de tres etapas, obteniendo un equipo de potencia de estructura compacta y robusta.
- Una vez construido el equipo, este fue sometido a pruebas prácticas con resultados exitosos.
- La utilización de los opto acopladores, es importante porque nos permite separar y aislar las tierras entre el circuito de control y el circuito de potencia con el objetivo de proteger la parte de control en caso de presentarse problemas con la respuesta del sistema en la parte de potencia del Inversor.
- El inversor multinivel construido a partir de puente "H" debe conectarse en cascada para obtener la máxima cantidad de niveles posibles. De esta forma con muy pocas etapas se pueden tener un gran número de niveles; en este caso con 3 etapas obtuvimos 8 niveles.
- Las pruebas realizadas en el laboratorio cumple satisfactoriamente con los parámetros de diseño señalados al inicio del segundo capítulo, pudiéndose comprobar prácticamente las buenas propiedades de la tecnología de los inversores multinivel.

5. REFERENCIAS

- [1] Benavent. (2001). Electrónica de Potencia, Teoría y Aplicaciones. México: Alfaomega.
- [2] Hart, D. W. (2001). Introducción a la Electrónica de Potencia. Madrid, España: PEARSON EDUCACION, S.A.
- [3] Mohan, N. (2009). Electrónica de potencia (Tercera ed.). MONTERREY, MEXICO.
- [4] Rashid, M. H. (2004). Electrónica de potencia (TERCERA ed.).
- [5] Ross. (1997). The Power of Electronics.
- [6] Sarzosa D. (2015). Tesis diseño y construcción de un prototipo didáctico de inversor multinivel en cascada, monofásico de tres etapas.

6. BIOGRAFÍA



¹ David Sarzosa, nació en Latacunga en 1986. Es Ingeniero Electromecánico de la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE en 2015. Su experiencia laboral incluye Sistemas Eléctricos, Mantenimiento Industrial, Control Industrial, Docencia desde el 2012 y a partir del 2015 es Docente de la Unidad de Gestión de Tecnologías – ESPE. Su campo de interés es la Automatización industrial, Energías Alternativas, Optimización, Robótica.

REGISTRO DE LA PUBLICACIÓN

| | |
|------------------|--------------------|
| Fecha recepción | 16 junio 2016 |
| Fecha aceptación | 15 septiembre 2016 |