

THD OPTIMIZATION OF A SINGLE PHASE MULTILEVEL INVERTER USING GENETIC ALGORITHMS

OPTIMIZACIÓN DEL THD EN UN CONVERTIDOR MULTINIVEL MONOFÁSICO USANDO ALGORITMOS GENÉTICOS

MSc. José Antonio Araque G., MSc. Jorge Luis Díaz R., PhD. Oscar E. Gualdrón G.

Universidad de Pamplona, Facultad de Ingenierías y Arquitectura, Grupo A&C.
Km. 1 vía a Bucaramanga, Pamplona, Norte de Santander, Colombia.
Tel.: +(57) (7) 568 5303, Ext. 164.
E-mail: {josearaque, jdiazcu, oscar.gualdrón}@unipamplona.edu.co

Abstract: This paper presents the optimization of THD (Total harmonic distortion) in a DC-AC converter employing genetic algorithms. The selected topology for inverter circuit is the cascade multilevel converter with asymmetric DC supplies (4 stages). The aim is to reach a THD less than 5% and obtain an output waveform with a frequency of 60 Hz and an output voltage of 120 Vrms. The results were simulated in Matlab® and validated by implementing a prototype converter.

Keywords: Multilevel converter, THD, genetic algorithm.

Resumen: En este trabajo se presenta la optimización del factor de distorsión armónica total (THD) para un convertidor DC-AC (corriente directa a corriente alterna) monofásico empleando algoritmos genéticos. La topología seleccionada para el circuito inversor es la de convertidor multi-nivel en cascada asimétrico de 4 etapas. La estrategia de modulación empleada fue en escalera o *step*. El propósito fue satisfacer un THD menor al 5% y obtener una forma de onda de salida con una frecuencia de 60 Hz y un voltaje RMS de 120V. Los resultados se simularon utilizando la herramienta computacional Matlab® y se validaron mediante la implementación física del convertidor.

Palabras clave: Convertidor multinivel, THD, algoritmo genético.

1. INTRODUCCIÓN

Los inversores multinivel son una tecnología emergente que ha surgido como alternativa a los convertidores tradicionales de dos niveles. Estos sistemas permiten convertir la energía eléctrica proporcionada por fuentes de corriente directa, tales como baterías o bancos de paneles solares, en una corriente alterna idealmente sinusoidal, cuyos parámetros (amplitud, frecuencia) pueden ser fijos o variables. El concepto general involucra un alto número de conmutadores basados en semiconductores de potencia que desarrollan la

conversión en pequeños pasos, logrando una forma de onda de salida con bajo contenido armónico (Skvarenina, 2002).

El primer trabajo relacionado con la conversión en múltiples pasos o niveles de tensión fue patentado en el año 1975 (Baker y Bennister, 1975). Posteriormente, en el año 1980 se patenta (Baker, 1980) una variante de convertidor multinivel al cual le fueron añadidos diodos de anclaje. La topología de convertidor multinivel anclado por capacitor (*Capacitor clamped*) fue introducida a mediados de los años 90 (Lavieville *et al.*, 1997),

(Meynard *et al.*, 1998). Esta topología ofreció varias ventajas sobre el inversor NPC (*Neutral Point diode Clamped*), como se expone claramente por (Rodríguez *et al.*, 2002). El convertidor multinivel en cascada con fuentes de DC separadas fue patentado en el año 1997 (Peng y Lai, 1997).

Desde los primeros trabajos en convertidores multinivel, se han llevado a cabo importantes avances que han permitido el desarrollo de esta tecnología. Entre las publicaciones más relevantes se puede citar a (Rodríguez *et al.*, 2002; Pandey *et al.*, 2006), donde se realiza una revisión del estado del arte de los convertidores multinivel. De otra parte, en (Malinowski y Stynski, 2007) se presenta un trabajo muy interesante que aborda el tema de la simulación de convertidores multinivel.

Otro aporte significativo lo han hecho trabajos de maestría y doctorado enfocados en los convertidores multinivel, dentro de los cuales se citan (Ríos, 2003; Negroni, 2007; Lega, 2007; Chavarría, 2010).

Para evaluar la calidad de la energía eléctrica generada por un circuito inversor suele emplearse el THD o distorsión armónica total, el cual es una medida del contenido armónico de la forma de onda de salida. Entre más bajo es el THD, mejor es la calidad de la señal. Debido a que en los circuitos inversores la forma de onda de salida es generada por medio de la conmutación de dispositivos semiconductores, es necesario encontrar los tiempos de disparo apropiados que permitan reducir el THD. Entonces, esta necesidad puede verse como un problema de optimización.

De otra parte, las técnicas de optimización heurística han surgido como una alternativa a los métodos clásicos basados en la estadística. La principal razón es que al estar inspirados en procesos naturales resultan menos afectados por los máximos locales que las técnicas tradicionales. Tal es el caso de los algoritmos genéticos que se basan en la selección natural para encontrar soluciones óptimas en un espacio de búsqueda imitando procesos biológicos como el cruce y la mutación.

El trabajo está organizado como sigue: la sección 2 presenta los conceptos básicos de los convertidores multinivel. En la sección 3 se estudian los tipos de modulación empleados en este tipo de convertidores. La sección 4 presenta los conceptos relacionados con los algoritmos genéticos. En la sección 5 se plantea el problema

de optimización, mientras que en la sección 6 se presentan los resultados de simulación obtenidos. Por último, la sección 7 muestra la validación de los resultados de simulación por medio de la implementación física del convertidor.

2. CONVERTIDORES MULTINIVEL

2.1. Conversión Multinivel

La conversión de potencia multinivel fue introducida a principios de los años 80. El concepto general involucra la utilización de un alto número de dispositivos semiconductores de conmutación para desarrollar la conversión en pequeños pasos de voltaje.

En la figura 1 se presenta un diagrama esquemático de un inversor monofásico con diferente número de niveles:

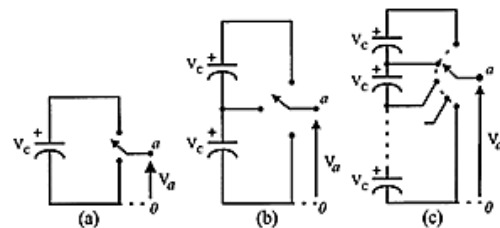


Fig. 1: Inversor Monofásico de (a) Dos Niveles, (b) Tres Niveles, (c) m Niveles.

Como se puede observar en la figura 2, en un convertidor multinivel se busca sintetizar una forma de onda mucho más parecida a una señal sinusoidal, en la cual, dependiendo del número de fuentes de DC disponibles, la distorsión va a ser mucho más baja. Entre sus principales ventajas podemos destacar (Ríos, 2002):

- La disposición del voltaje de entrada en múltiples niveles permite aumentar varias veces la tensión de trabajo del convertidor empleando los mismos interruptores que un convertidor convencional.
- La potencia de los convertidores se incrementa al emplear voltajes mayores, sin necesidad de incrementar la corriente, evitando así mayores pérdidas durante la conducción, y por consecuencia mejorar el rendimiento del convertidor.

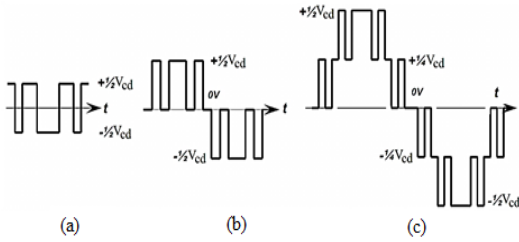


Fig. 2: Salida de voltaje del inversor (a) 2 niveles, (b) 3 niveles, (c) 5 niveles.

2.2. Inversor multinivel en cascada

Esta topología se basa en la conexión en serie de inversores monofásicos con fuentes de alimentación independientes. La figura 3 muestra el circuito de potencia para un inversor monofásico de tres etapas:

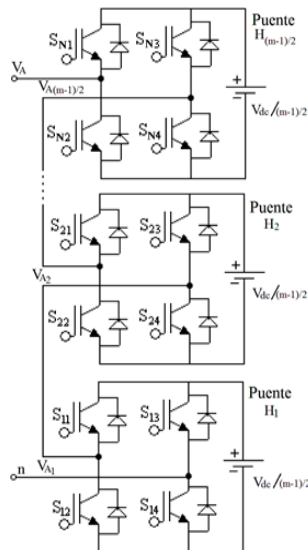


Fig. 3: Inversor multi-nivel en cascada

Para el caso en que las fuentes de alimentación de todas las etapas es la misma, a este convertidor se le denomina inversor multinivel en cascada simétrico. En el caso en que las fuentes de alimentación de las etapas son distintas, a este convertidor se le denomina inversor multinivel en cascada asimétrico. Generalmente en este tipo de convertidor, las fuentes de DC entre etapas están relacionadas por un factor entero. La generación de la forma de onda de salida se obtiene a partir de la conmutación apropiada de cada etapa lo que permite sumar los diferentes niveles de tensión generados por el circuito, tal y como se ve en la figura 4:

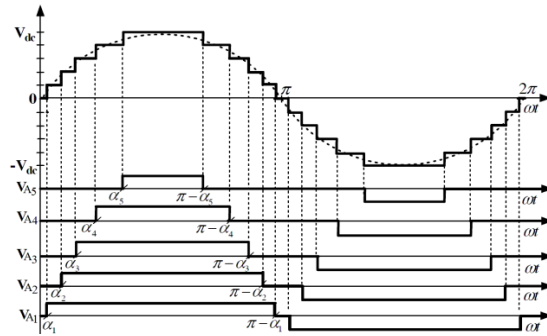


Fig. 4: Síntesis de la forma de onda de salida de un convertidor multinivel en cascada simétrico.

3. ESTRATEGIAS DE MODULACIÓN

Los objetivos principales de las estrategias de conmutación para convertidores CD/CA son, aparte de regulación de la amplitud y frecuencia de salida, la minimización de los contenidos armónicos de la tensión de salida del inversor y el equilibrio de las tensiones instantáneas de las capacidades del convertidor. En la figura 5 se presenta un esquema de la clasificación de las técnicas de conmutación para convertidores multinivel.

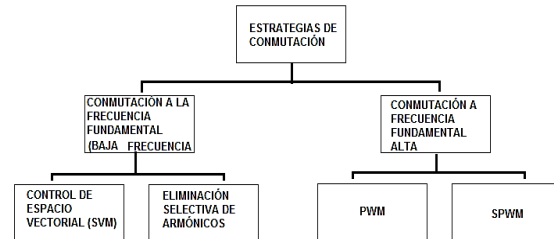


Fig. 5: Estrategias de conmutación en convertidores multi-nivel.

La técnica más empleada en convertidores multinivel es la conmutación en escalera, la cual busca sintetizar una forma de onda escalonada muy parecida a una senoide con bajo contenido armónico. Este tipo de salida se puede apreciar en la figura 6 para 6 y 11 niveles en la salida del convertidor.

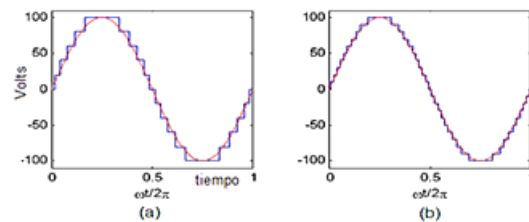


Fig. 6: Forma de onda escalonada de (a) 11 niveles, (b) 21 niveles.

Con el propósito de mejorar el contenido armónico de la señal de salida del convertidor, es posible implementar una modulación sinusoidal de ancho de pulso (SPWM) de múltiple portadora. En este caso, la señal de referencia sinusoidal es comparada con varias portadoras triangulares en función del número de niveles del convertidor. Las señales obtenidas se usan para disparar adecuadamente los dispositivos de conmutación. En la figura 7 se puede apreciar un ejemplo para este tipo de modulación.

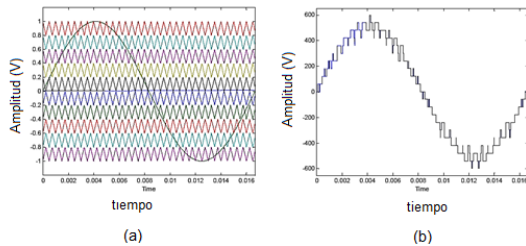


Fig. 7: (a) Modulación SPWM de portadora múltiple, (b) Forma de onda de salida del convertidor.

Existen además, otras variaciones de las técnicas mencionadas como el RPWM o PWM aleatorio, la modulación delta y la modulación trapezoidal, las cuales buscan, en todos los casos, mejorar el contenido armónico de la señal de salida para minimizar el THD.

4. ALGORITMOS GENÉTICOS

El algoritmo genético (AG) es una técnica de búsqueda y optimización basada en los principios de la genética y la selección natural. Un AG permite a una población compuesta por muchos individuos evolucionar bajo reglas de selección específicas hacia un estado que maximiza el *fitness* o aptitud, es decir, minimiza la función de costo (Haupt y Haupt, 2004). Entre las ventajas de los AG se destacan:

- Optimiza tanto con variables continuas como discretas.
- Permite realizar una búsqueda amplia en el espacio de soluciones.
- Puede manejar un número grande de variables.
- Es ideal para computadores paralelos.
- Optimiza variables con funciones de costo de alta complejidad.
- Brinda una lista de variables óptimas, no únicamente una simple solución.

En la figura 8 se aprecia el esquema general de ejecución del algoritmo genético. El proceso inicia con la generación aleatoria de una población inicial, continua con la selección de los individuos que van a ser cruzados. Se generan entonces los descendientes los cuales son sometidos a una mutación que altera algunos de sus genes. Los nuevos individuos son evaluados e insertados en la población para finalmente evaluar el criterio de optimización y verificar si este se cumple o si es necesario iterar nuevamente.

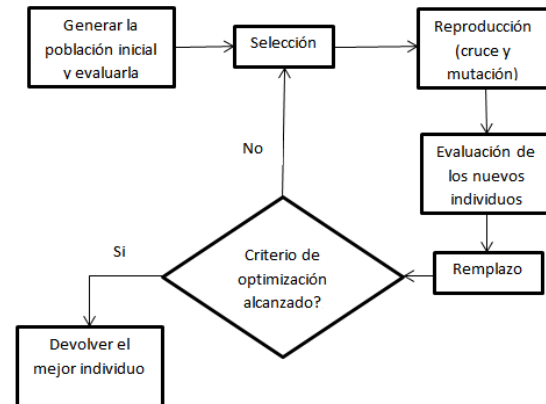


Fig. 8: Esquema general de ejecución del algoritmo genético.

5. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA DE OPTIMIZACIÓN

Como se vio en la sección 2.2, el voltaje de salida de un convertidor multinivel consiste en la suma de los niveles individuales de cada etapa del convertidor, como se aprecia en la figura 9.

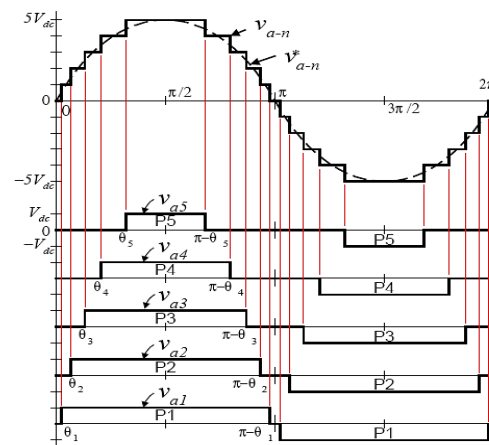


Fig. 9: Construcción de una señal escalonada a partir de niveles individuales.

El voltaje de salida de esta forma de onda escalonada puede expresarse entonces como (Krikor, K. *et al.*, 2008):

$$v_{out} = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{4V_{CD}}{np} \left[\sum_{k=1}^s \cos(nq_k) \right] \sin(n\omega t) \quad (1)$$

Donde:

n es el orden armónico impar (1, 3, 5, 7, 9...)

s es el número de etapas del convertidor.

k es un entero >0 (1, 2, 3, 4, 5... s)

q_k es el el k -ésimo ángulo de disparo, que debe satisfacer:

$$q_1 < q_2 < q_3 < p/2 \quad (2)$$

A partir de (1), la amplitud de las armónicas impares, incluyendo la componente fundamental se puede expresar como:

$$a_n = \frac{4V_{CD}}{np} \sum_{k=1}^s \cos(nq_k) \quad (3)$$

Expandiendo la ecuación anterior, se tiene:

$$a_n = \frac{4V_{CD}}{np} [\cos(nq_1) + \cos(nq_2) + \dots + \cos(nq_s)] \quad (4)$$

Los ángulos de conducción $\{q_1, q_2, q_3, \dots, q_s\}$ pueden ser seleccionados de tal forma que la distorsión armónica total de voltaje sea mínima. En función de lo descrito, el problema de optimización se puede plantear así:

Minimizar:

$$THD(\%) = \left[\left(\frac{1}{a_1^2} \sum_{n=3}^{\infty} (a_n^2) \right)^{1/2} \right] \cdot 100\% \quad (5)$$

Donde:

a_1 es la amplitud de la armónica fundamental.

a_n es la amplitud de la n -ésima armónica, con n impar.

Satisfaciendo la ecuación (4), sujeto a las restricciones:

$$a_1 = 169.7V \quad (6)$$

$$a_n = 0 \text{ Para } n > 1 \text{ impar} \quad (7)$$

$$0 < q_1 < q_2 < \dots < q_k < p/2 \quad (8)$$

El algoritmo genético entonces, toma como población los ángulos q_k . Luego, en cada iteración del algoritmo se aplican los operadores de selección, cruce y mutación para encontrar las soluciones a la ecuación descrita por (4), por último se evalúa la función de costo que en este caso, es el THD. El algoritmo se detiene cuando se

satisfacen las condiciones de parada dadas por el número de iteraciones y/o por la tolerancia de la solución.

6. RESULTADOS DE SIMULACIÓN

El esquema de optimización propuesto se simuló en Matlab para un convertidor multinivel monofásico asimétrico de 4 etapas (31 niveles) para una amplitud deseada de la componente fundamental de 169.7 V (120 Vrms), una frecuencia de salida de 60 Hz y un THD < 5%. Para el cálculo del THD se tuvieron en cuenta los primeros 40 armónicos de la señal de salida.

Para el AG la población inicial fue de 20 individuos y el número máximo de iteraciones fue de 200.

En la figura 10 se puede ver la forma de onda del voltaje de salida del convertidor así como el espectro de armónicos en el que se aprecia la calidad de la señal de salida.

La optimización del THD a medida que el AG se va ejecutando se observa en la figura 11, donde se aprecia que se alcanza un valor del 2.084%.

En la figura 12 se observa la optimización de los ángulos de disparo representados por x_k .

La figura 13 presenta la evolución de los armónicos de la señal de salida, allí se aprecia que a medida que el AG se ejecuta, el armónico fundamental tiende al valor deseado (169.7V) mientras que los demás armónicos tienden a cero, como es de esperarse.

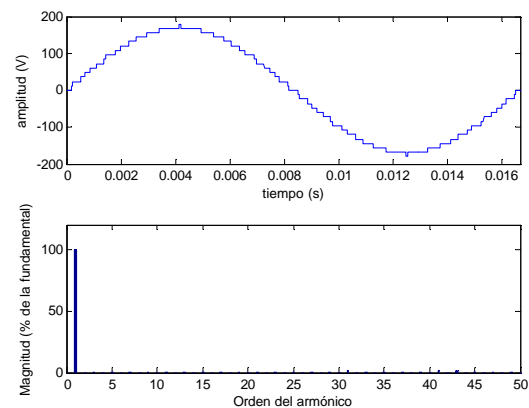


Fig. 10: Forma de onda de salida y espectro de armónicos del convertidor

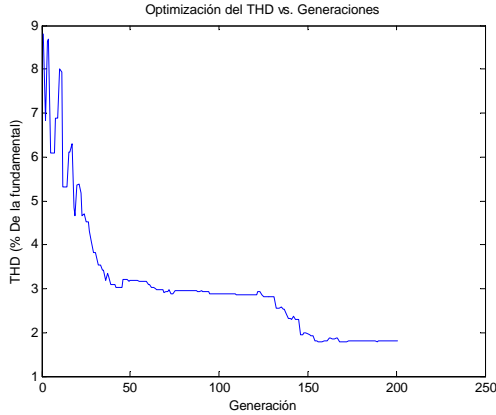


Fig. 11: Optimización THD vs. generación del AG.

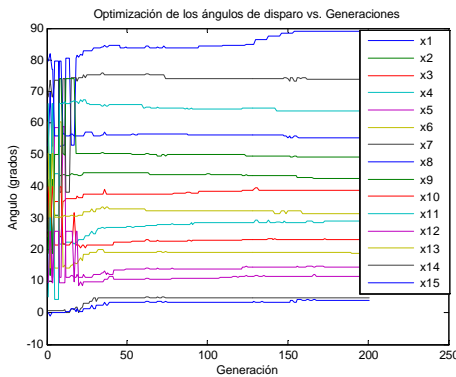


Fig. 12: Optimización de los ángulos de disparo vs. Generación del AG.

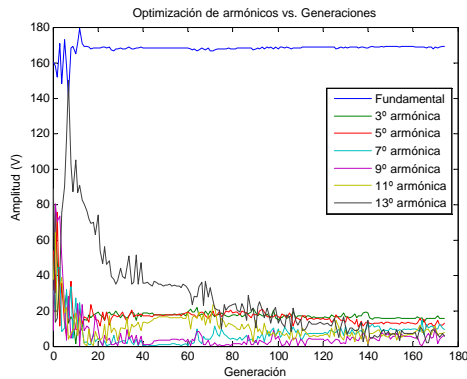


Fig. 13: Optimización de las componentes armónicas vs. generación del AG.

7. IMPLEMENTACIÓN DEL PROTOTIPO

Para validar los resultados de simulación se implementó un prototipo del convertidor multinivel y se programaron los ángulos de disparo obtenidos en la tarjeta de control basada en un PIC18F4550. En la figura 14 se aprecia un diagrama en bloques del experimento. Se ha empleado un sistema de

adquisición de datos basada en el osciloscopio digital Agilent DSO3202-A para hacer la visualización y el análisis de la forma de onda obtenida.

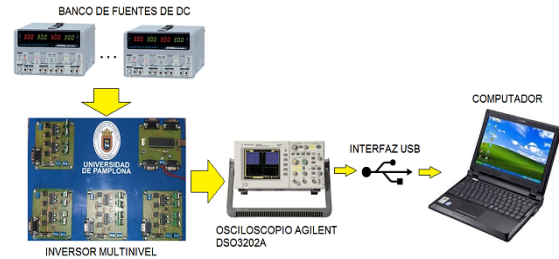


Fig. 14: Diagrama en bloques del sistema implementado.

En la figura 15 se muestra la forma de onda de salida real, mientras que en la figura 16 se aprecia el perfil de armónicos. Debe notarse la similitud de la forma de onda real con la simulada. En la tabla 1 se muestra una comparación de los resultados obtenidos.

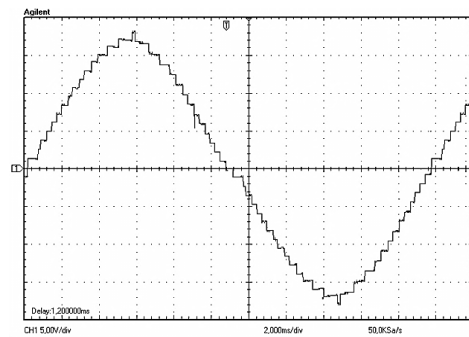


Fig. 15: Forma de onda de salida real.

Tabla 1: Comparación de resultados:

	Simulación	Valores reales
THD%	2.08	2.21
Frecuencia(Hz)	60	60.8
Vrms (V)	120.1	119.45

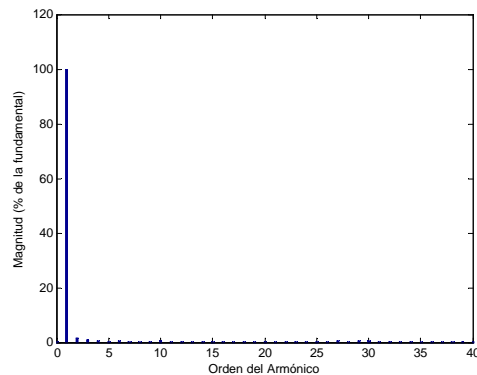


Fig. 16: Espectro de armónicos real.

8. CONCLUSIONES

Los resultados observados en las figuras 10, 11, 12 y 13 muestran que el método seleccionado para hallar los ángulos de disparo apropiados funciona de manera satisfactoria, permitiendo obtener un THD de apenas 2.084% simulado, o de 2.21% real.

La implementación física del convertidor demostró que los ángulos de disparo hallados en las simulaciones son los apropiados, permitiendo obtener una forma de onda y un perfil de armónicos muy próximos a los simulados.

La pequeña diferencia que se puede apreciar entre los resultados de simulación y la implementación física se deben principalmente a los retardos de disparo que deben asegurarse entre dispositivos de conmutación de la misma rama y a pequeñas variaciones de las fuentes de DC.

El uso de algoritmos genéticos permite que no sea necesario abordar la solución de un sistema de ecuaciones trascendentales de manera formal, ya que el AG explora en el espacio de búsqueda a partir de varios puntos de solución y no se enfoca en encontrar soluciones “exactas” sino la mejor solución al problema.

Ya que el AG es un método de optimización meta-heurístico, cada vez que se ejecuta el AG se puede llegar a soluciones ligeramente distintas pero que satisfacen el problema de minimización.

REFERENCIAS

- Skvarenina, T. (2002). *The Power Electronics Handbook*. Florida: Ed. CRC Press, pp. 283.
- Baker, R. and Bennister, L. (1975). *Electric power converter*. U.S. Patent 3 867 643.
- Baker, R. *High-Voltage Converter Circuit*. U.S. Patent 0 420 3 151, 1980.
- Lavieville, J. *et al.* (1997). “Electronic circuit for converting electrical energy and power supply installation making use thereof”. U.S. Patent 5668711.
- Meynard, T. *et al.* (1998). *Electronic circuit for converting electrical energy*. U.S. Patent 5 706 188.
- Rodríguez, J. *et al.* (2002). “Multilevel inverters: A survey of topologies, controls and applications”. *IEEE Transactions On Industrial Electronics*, Vol. 49, No. 4, pp 724-738.
- Peng, F. y Lai, J. (1997). *Multilevel cascade voltage-source inverter with separate DC sources*. U.S. Patent 5 642 275.
- Pandey, A. *et al.* (2006). “A Review of Multilevel Power Converters”. *IE Journal-EL*.
- Malinowski, M. y Stynski, S. (2007). “Simulation of single-phase cascade multilevel PWM converters”. *EUROCON 2007*, pp. 1524-1529. Varsovia.
- Ríos, F. (2003). *Diseño y construcción de un inversor trifásico multinivel*. Tesis de Maestría, Departamento de Ingeniería Eléctrica, Universidad Católica de Chile, Santiago de Chile.
- Negroni, J. (2007). “Análisis y Diseño de Controladores para Inversores Multinivel en Sistemas Fotovoltaicos Conectados a Red”. Tesis Doctoral, Barcelona.
- Lega, A. (2007). *Multilevel Converters: Dual Two-Level Inverter Scheme*. Tesis Doctoral, Dpt. de Ingeniería Eléctrica, Universidad de Bologna, Italia.
- Chavarría, J. (2010). *Diseño e Implementación de un Inversor Multinivel para Sistemas Fotovoltaicos Conectados a Red*. Tesis de Maestría, Departamento de Ingeniería Electrónica, Universidad Politécnica de Cataluña, Barcelona.
- Haupt, R. y Haupt, S. (2004). *Practical genetic algorithms*, Ed. Wiley-Interscience, Estados Unidos de América, 2^{da} edición.
- Krikor, K. *et al.* (2008). “Optimum Design of Single-Phase Cascade Multilevel Inverter Using OHESW Technique”. *Eng. & Tech.*, Vol.26, No.12, pp. 1492-1507.