

Optimización evolutiva del contenido armónico de un inversor multinivel trifásico de fuentes independientes

Luis D. Pabón F.¹, Jorge L. Díaz R.², Aldo Pardo G.³

^{1,2} Programa de Ingeniería Eléctrica. Grupo de Investigación Sistemas Energéticos. Universidad de Pamplona. Norte de Santander- Colombia

³ Programa de Ingeniería Mecatrónica. Grupo de Investigación Automatización y Control. Universidad de Pamplona. Norte de Santander- Colombia

Resumen

Este artículo trata sobre la optimización distorsión armónica total (THD) de un convertidor multinivel trifásico con fuentes independientes. Mediante la programación de un algoritmo genético que localice el punto de menor distorsión armónica. Como función objetivo se toma el THD de la tensión de fase, en términos de los ángulos de conmutación en la modulación. De esta manera el problema se resuelve mediante un enfoque netamente numérico y evitando los problemas asociados a las técnicas de modulación convencionales que utilizan comparaciones con ondas portadoras para obtener una modulación. Los resultados de la optimización fueron probados y validados mediante simulación.

Palabras Clave: Algoritmo genético, convertidor multinivel, optimización, simulación, THD.

Evolutionary optimization of the harmonic content of a multilevel three phase power inverter with independent sources

Abstract

This paper deals with the optimization of the total harmonic distortion (THD) of a three phase multilevel power converter with independent sources. A genetic algorithm was programmed in order to locate the point of lowest harmonic distortion. As fitness function the THD of the phase voltage was used, in terms of commutation angles in the modulation. Thus, the problem is solved by giving a purely numerical approach and avoiding the problems associated with conventional techniques using comparisons modulation carrier wave for modulation. The optimization results were tested and validated by simulation.

Keywords: genetic algorithm, multilevel inverter, optimization, simulation, THD.

Para citar este artículo: Pabón F. LD, Díaz R. JL, Pardo G. A. Optimización evolutiva del contenido armónico de un inversor multinivel trifásico de fuentes independientes. Revista Bistua. 2015.13(2):37-46.

✚Autor para el envío de correspondencia y la solicitud de las separatas: Jorge L. Díaz R. Programa de Ingeniería Eléctrica. Grupo de Investigación Sistemas Energéticos. Universidad de Pamplona. Norte de Santander- Colombia. jdiazcu@unipamplona.edu.co

Recibido: Noviembre 28 de 2014.

Aceptado: Abril 02 de 2015.

Introducción

El aumento de los equipos basados en electrónica de potencia genera en las redes actuales problemas de la calidad de la energía en los usuarios y compañías que brindan el servicio eléctrico¹. Esto se debe a que las formas de ondas generadas por los dispositivos electrónicos, tales como convertidores de potencia, no son ondas sinusoidales puras², debido a que las técnicas de modulación de ancho de pulso (PWM) que actualmente se usan poseen altos contenidos armónicos³⁻⁵. Los convertidores convencionales presentan ciertos problemas en cuanto a calidad de la energía se refiere, por la distorsión armónica que generan^{6,7}. Las tendencias recientes en aplicaciones industriales y redes eléctricas de media tensión apuntan a la utilización de equipos que disminuyan las pérdidas y mejoren la calidad de la energía, por tanto para solucionar estos

inconvenientes referentes a la conversión de potencia DC/AC en las diferentes aplicaciones, se ha propuesto utilizar inversores de potencia multinivel^{8,9}, debido a que la tensión de salida de estos convertidores presenta un contenido armónico inferior a la obtenida con un convertidor convencional¹⁰. Por lo que en este trabajo se presenta una optimización del total de distorsión armónica total (THD) de un convertidor de potencia multinivel trifásico, como solución al problema antes mencionado, la optimización se hace mediante técnicas evolutivas y la validación se hace mediante simulación en Matlab[®].

Estado del arte

El primer convertidor multinivel se desarrolló en el año de 1981, utilizando la topología de fijación de diodos para obtener una modulación de tres escalones¹¹. A partir de este trabajo el convertidor multinivel ha tomado diferentes rumbos de mejoramiento¹², una de estas

propuestas es utilizar fuentes de tensión independientes y puentes H, esta topología recibe el nombre convertidor multinivel en cascada de puentes H con fuentes independientes¹⁰.

En el campo de la optimización del contenido armónico de las modulaciones de los convertidores multinivel, se han propuesto numerosas técnicas dependiendo de: la topología utilizada, el objetivo específico y la forma de la búsqueda del punto óptimo. Presentándose estrategias muy prometedoras en la línea de los algoritmos evolutivos como enjambre de partículas (PSO)¹³, y algoritmos genéticos (GA)¹⁴ planteándose comparaciones de las técnicas más usuales y concluyendo (en algunos trabajos) que los algoritmos genéticos¹⁵ ofrecen mejores resultados¹⁶.

Convertidores Multinivel en Cascada

Los inversores multinivel con puente H en cascada (CMLI) tiene como principio de funcionamiento básico la suma de la forma de onda de cada puente H para la realización de una onda de tensión salida con mínima distorsión armónica al controlar los ángulos de disparo de los diferentes niveles de tensión¹⁰.

En este trabajo se selecciona la topología del inversor multinivel en cascada de fuentes independientes de dos etapas de puente H para cada fase, debido a su poca complejidad para alcanzar 7 niveles de tensión utilizando fuentes de tensión en relación 1:2 la fig.1 muestra la topología del convertidor.

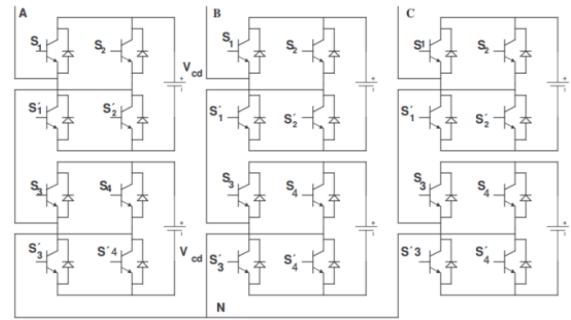


Figura 1: Inversor multinivel de puentes H fuente común de 5 niveles.

La forma de onda de la tensión de salida en fase del convertidor se muestra en la figura 2.

Modulación multinivel PWM de siete escalones

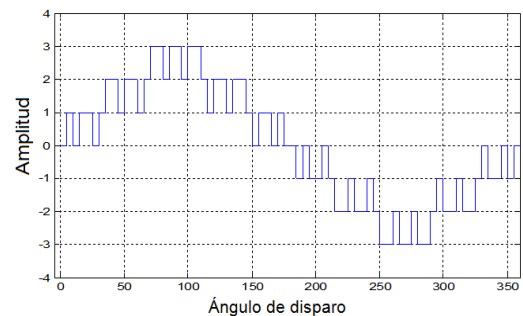


Figura 2: Modulación PWM multinivel de 7 escalones.

Modelado matemático de la modulación

La forma de onda de una modulación PWM-multinivel para 7 escalones es la mostrada en la figura 2. Como la forma de la modulación guarda simetría de 1/4 de onda, solo es necesario definir los ángulos de disparo en el primer cuarto de onda (ver figura 3), las demás partes de la modulación se construyen mediante relaciones trigonométricas. De esta manera se define un vector $\mathbf{L} = [x \ y \ z]$ que representa el número total de ángulos de disparo en cada escalón.

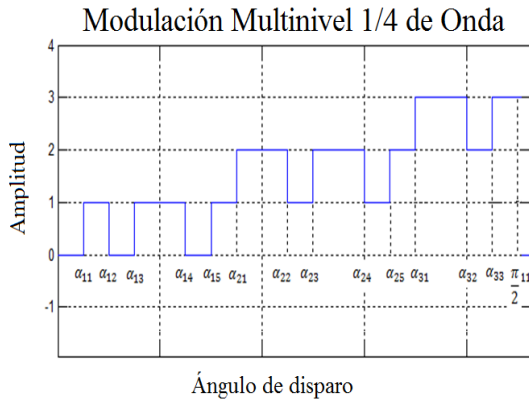


Figura 3: Cuarto de onda de la modulación de siete escalones.

La serie de Fourier para formas de onda periódicas establece que:

$$v(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\alpha} (a_n \cos n\omega_0 t + b_n \sin n\omega_0 t) \quad (1)$$

Dónde n es el número del armónico, ω_0 la frecuencia fundamental de la onda, t el tiempo, $a_0/2$ es la componente en dc, que se calcula mediante la expresión:

$$a_0 = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} v(\omega t) d(\omega t) \quad (2)$$

Dónde a_n un coeficiente de la serie de Fourier, que se calcula con la ecuación (3):

$$a_n = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} v(\omega t) \cos n(\omega_0 t) d(\omega t) \quad (3)$$

Y b_n el coeficiente de la serie de Fourier, calculada mediante:

$$b_n = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} v_0(\omega t) \sin n(\omega_0 t) d(\omega t) \quad (4)$$

La forma de onda (Fig. 4.) presenta simetría impar y el lóbulo positivo es igual al negativo de esta manera aplicando las simetrías según la teoría de las series de Fourier.

$$a_0 = 0 \text{ y } a_n = 0 \quad (5)$$

Sólo quedará el coeficiente relacionado con el seno (b_n), por tanto la forma de onda en términos de la serie de Fourier será expresada de la siguiente manera:

$$v(t) = \sum_{n=1}^{\alpha} b_n \sin(n\omega_0 t) \quad (6)$$

Calculando b_n en términos del vector L para la forma de onda:

$$b_n = \frac{4vdc}{\pi n} \left[\sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^{Li} (-1)^{j-1} \cos n\alpha_{ij} \right] \text{ para } n \text{ impares}$$

$$\text{y } b_n = 0 \text{ para } n \text{ pares} \quad (7)$$

Donde, i es el número del escalón (por eso la sumatoria va de 1 a 4), Li la componente i del vector L y α_{ij} el ángulo j del escalón i , este puede ser de encendido o apagado. Para obtener una escalera las componentes del vector L deben ser impares.

Si la magnitud pico de la armónica n , en la serie de Fourier, se define como:

$$h_n = \sqrt{a_n^2 + b_n^2} \quad (8)$$

Reemplazando (5) y (7) en (8) se obtendrá la magnitud pico de cada armónico n , en donde sólo existirán armónicos impares debido a que $b_n=0$ si n es par, por tanto:

$$h_n = \frac{4vdc}{\pi n} \left[\sum_{i=1}^4 \sum_{j=1}^{Li} (-1)^{j-1} \cos n\alpha_{ij} \right] \text{ para } n = 1, 3, \dots \quad (9)$$

El estándar IEEE 519 de 1992 (IEEE, 1992), define el total de distorsión armónica total como la ecuación 10:

$$THD = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{50} h_n^2}}{h_1} * 100 \quad (10)$$

Dónde el armónico h_1 es la componente fundamental y h_n el pico del armónico n . Remplazando (9) en (10).

$$THD = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{50} \left(\frac{1}{n} \left[\sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^{L_i} (-1)^{j-1} \cos n \alpha_{ij} \right] \right)^2}}{\left[\sum_{i=1}^4 \sum_{j=1}^{L_i} (-1)^{j-1} \cos \alpha_{ij} \right]} * 100 \quad (11)$$

Donde n sólo toma valores impares y L_i los componentes del vector $L = [x \text{ y } z]$. De esta manera la ecuación 11 define la función objetivo a minimizar mediante el algoritmo de optimización.

Optimización

Mediante la utilización de Matlab® y su comando **ga** (*genetic algorithm*) se programaron los algoritmos correspondientes al modelo matemático de la función *fitness* (Ecuación 11) y su respectiva optimización mediante algoritmos genéticos¹⁷.

El tamaño de la población para el algoritmo se tomó de 20 individuos, cada individuo (X) conformado por el total de ángulos de disparo en el primer cuarto de onda de la modulación:

$$X = [\alpha_{11} \alpha_{12} \dots \alpha_{1x} \alpha_{21} \alpha_{22} \dots \alpha_{2y} \alpha_{31} \dots \alpha_{3z}] \quad (12)$$

Acompañado del vector L , que le indica programa encargado de evaluar la función *fitness* que ángulos le corresponden a cada escalón

Las condiciones de parada del algoritmo fueron asignadas por convergencia, en la cual los valores de la población no cambian ó porque el número de generaciones llega al máximo permitido.

41

Resultados del algoritmo

La figura 7 se muestra la evolución del algoritmo.

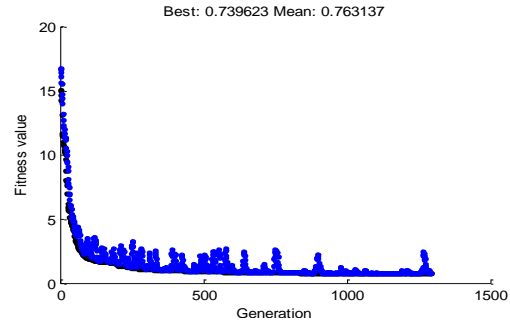


Figura 4: Evolución del algoritmo.

El *fitness* para este individuo, es decir su THD, fue determinado en 0.0004 %.

La forma de onda de la modulación con los ángulos calculados por el algoritmo se muestra en la figura 8.

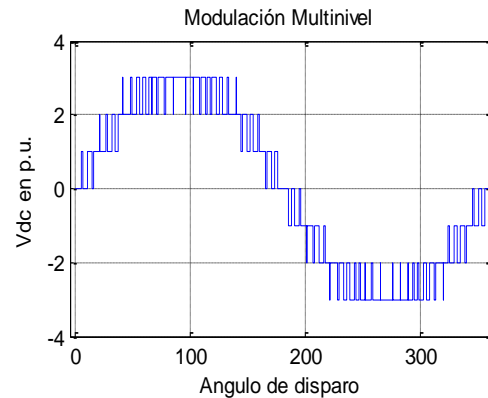


Figura 5: Forma de onda de la modulación por fase obtenida.

El espectro armónico se observa en la siguiente figura.

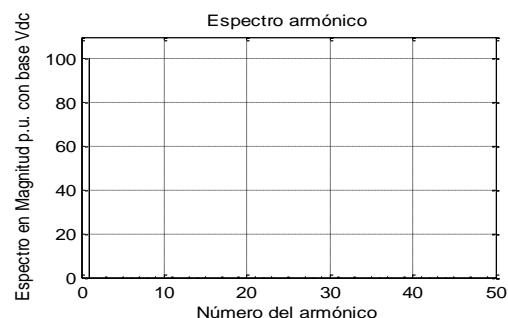


Figura 6: Espectro armónico de la modulación obtenida.

En este espectro se ve claramente que el contenido armónico es nulo, de ahí que el THD sea muy bajo. Las tres fases del convertidor se muestran en la figura 7.

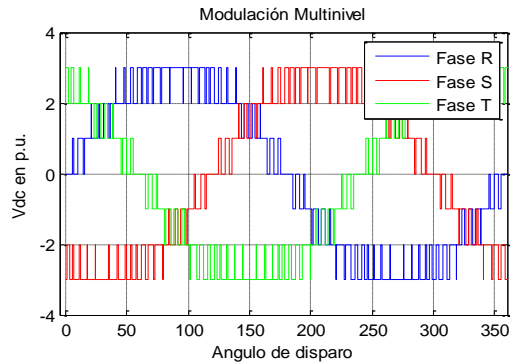


Figura 7: Modulación trifásica obtenida.

Simulación

La topología de convertidor trifásico de fuentes independientes descrita anteriormente y adoptando la modulación hallada se llevó a la simulación utilizando Simulink® de Matlab® y utilizando su bloque de transformada rápida de Fourier (FFT) se obtuvo el espectro y los valores del total de contenido armónico en diferentes bandas. El esquema de la simulación es el siguiente (ver figura 8).

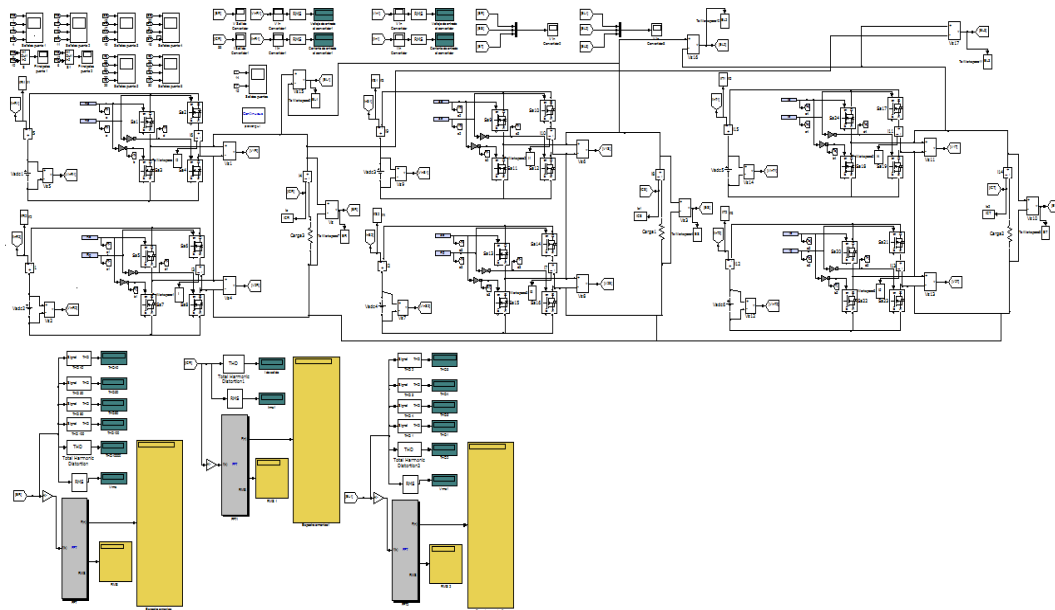


Figura 8: Esquema de simulación.

La Figura 9 muestra la forma de onda de la tensión de fase a la salida del convertidor y la figura 10 el espectro armónico en valores pico, dado por la simulación.

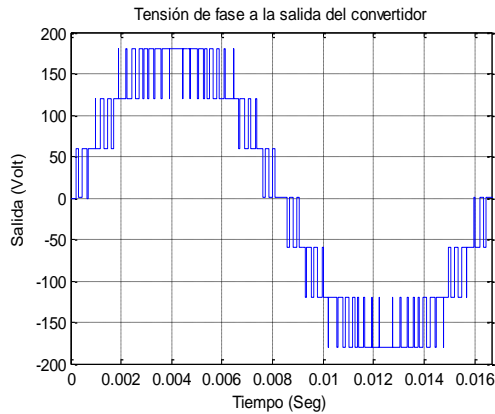


Figura 9: Forma de onda de la tensión de fase en la simulación.

En esta figura se observa la misma forma de onda que la planteada por el algoritmo de optimización, solo que escalada al valor de la fuente de potencia deseada.

El espectro armónico de la simulación por fase se muestra en la figura 10.

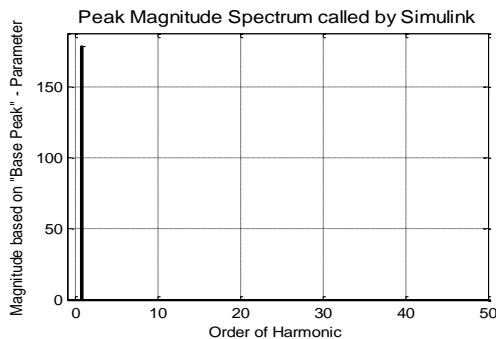


Figura 10: Espectro de la tensión de fase de salida.

Las tensiones de fase trifásicas se muestran en la siguiente figura:

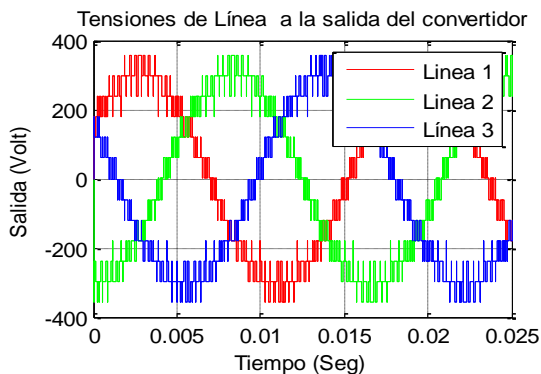


Figura 11: Salida trifásica del convertidor.

Las tensiones de línea presentan más escalones que las tensiones de fase, esto se debe a la sustracción de los dos voltajes desfasados 120° entre sí.

El espectro de las tensiones de línea se muestra en la figura 12.

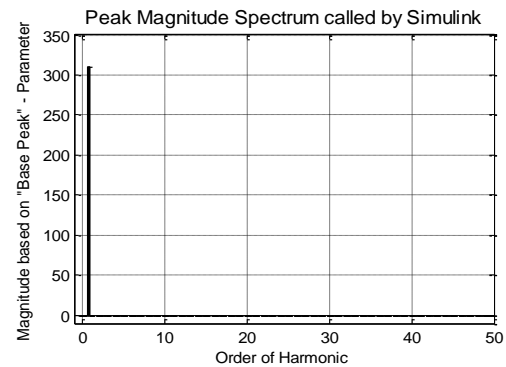


Figura 12: Espectro armónico de las tensiones de línea.

La figura 13 muestra los resultados del contenido armónico de la simulación.

Como se observa en la figura el THD evaluado hasta el armónico 50 es de 0.0002799% Los cual es más bajo que el contenido calculado por el algoritmo de optimización.

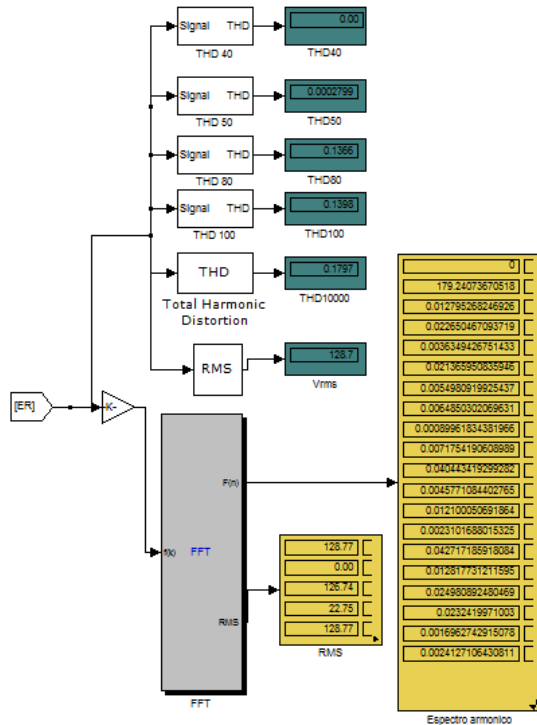


Figura 13: Resultados del espectro.

En este espectro se ve claramente que en las tensiones de línea se presenta un espectro armónico limpio y que al optimizar las tensiones de fase, las tensiones de línea también se optimizan, y mejoran la respuesta debido a que se presentan más escalones, lo que acerca la forma de onda a una onda sinusoidal pura.

La corriente de línea se muestra en la figura 14.

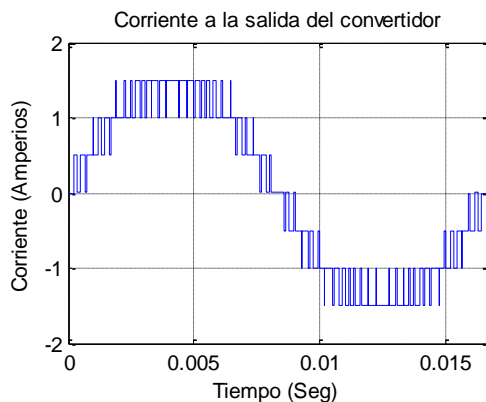


Figura 14: Onda de la corriente de carga.

Como la carga simulada es una carga resistiva la forma de onda de la corriente presenta la misma forma de onda de la tensión de fase, su contenido armónico es igual al de la tensión de ahí que los espectros sean iguales.

Conclusiones

Las simulaciones realizadas validaron que la expresión obtenida para cuantificar el total de distorsión armónica (THD) en una banda definida entre el armónico 1 (componente fundamental) y una cota superior en la armónico 50 (definida por la IEEE 519), para una modulación PWM multinivel de siete escalones, es correcta, ya que se puede evidenciar en los resultados de la simulación, que los espectros y los valores del THD coinciden con los calculados por el algoritmo de optimización.

El algoritmo de optimización desarrollado en este proyecto es un algoritmo óptimo pues al recibir el número suficiente de ángulos de disparo en los escalones indicados, será capaz de anular todo el contenido armónico definido entre los armónicos 2^{do} y el 50^{mo}, sin embargo, se pueden presentar modulaciones que no sean posible de implementar debido a la respuesta de los dispositivos involucrados en el convertidor.

El valor del THD optimizado teórico de este proyecto se define como 0.0004% debido a que este es el contenido armónico de la modulación optimizada hasta el armónico 50^{mo}, siendo esta la cota superior de evaluación establecida por la norma IEEE 519 del 1992. Este THD cumple ampliamente este estándar, que

45

establece que para sistemas de baja tensión de uso general el máximo contenido en la onda de tensión debe ser del 5% y para aplicaciones especiales del 3%.

En este tipo de aplicaciones de optimización los algoritmos genéticos tienen un desempeño excelente; ya que permiten encontrar puntos óptimos en poco tiempo, el próximo trabajo será implementar algoritmos de este tipo en aplicaciones en tiempo real para la optimización online de armónicos.

Referencias Bibliográficas

1. Enriquez, G. El ABC de la calidad de la energía eléctrica. México.: Limusa, Noriega Editores,, 2004 .
2. Mohan, N, Undeland, T M and Robbins, R W. Electrónica de Potencia: Convertidores Aplicación y Diseño. s.l. : McGraw-Hill, 2009.
3. Sanchez, M A. "Calidad de la energía eléctrica. Mexico: México: Instituto Tecnológico de Puebla, 2009.
4. Spertino, F P. Inverters for grid connection of photovoltaic systems and power quality: Case studies. Alborg : s.n., 2012.
5. Suxiang, Q, Xianming, X and Yuansheng, X. Single-Phase Grid-Connected Photovoltaic System Based on Boost Inverter. Power and Energy Engineering Conference (APPEEC), Power and Energy Engineering Conference (APPEEC). 2012
6. Mohammad, S Z, Omar, I R and Ibrahim, A N. A Review of Single-Phase Single Stage Inverter Topologies for Photovoltaic System.,4th Control and System Graduate Research Colloquium Shah Alam, Malaysia. 2013
7. Castilla, , M, Miret, J and Sosa, J. Grid-Fault Control Scheme for Three-Phase Photovoltaic Inverters With Adjustable Power Quality Characteristics, Power Electronics, IEEE Transactions Vol25, 2013 pp. 2930 – 2940.
8. Karuppanan, M and Kamalakanta., P. PI, PID and Fuzzy Logic Controlled Cascaded Voltage Source Inverter based Active Filter for Power Line Conditioners. WSEAS Transactions on Power Systems, pp. 100-109. 2011
9. Longhua, Z, Qing, F and Xiangfeng, L. A novel photovoltaic grid-connected power conditioner employing hybrid multilevel inverter. Sustainable Power Generation and Supply, SUPERGEN '09. International Conference on Nanjing. 2009
10. Rodriguez, J, Lai, J S and ZhengPeng., F Multilevel inverters: a survey of topologies, controls, and applications, IEEE Trans. on Ind. Elect., 2002, pp. 724- 738.
11. Baker, R H and Lawrence, H B. Electric Power Converter, US.Patent Number 3,867,643. 1975.
12. Malinowski, M, Gopakumar, M and Rodriguez, J. A Survey on Cascaded Multilevel Inverters. IEEE transactions on industrial electronics, 2010, pp. 2197-2206.
13. Narayan, R. and Chatterjee, D.y Kumar, S. A PSO based optimal switching technique for voltage harmonic reduction of multilevel inverter, Expert Systems with Applications, 2010, pp. 7796-7801.
14. Periasamy, M and Shankar, M. "Harmonic optimization of cascade multilevel Inverter with unequal DC sources using genetic algorithm". , International Journal of Engineering Research & Technology. 2012
15. Diaz, J L, Pabón, L D and Pardo, A. THD Improvement of a PWM Cascade Multilevel Power Inverters Using Genetic Algorithms as

Optimization Method. Wseas Transactions On Power Systems, 2015, pp. 46-54.

46

16. Debnat, S, Narayan, S and Ghosh, T. Comparison of Different Soft Techniques applicable to Multilevel Inverter for Harmonic Elimination, International journal of computer application. 2012

17. Goldberg, D E. Genetic Algorithms in Search, Optimization and Machine Learning. Addison-Wesley Publishing Company., 1989.

18. IEEE . IEEE Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power Systems. . s.l. : IEEE, 1992.

L. D. Pabón Fernández.Ms.C. Joven investigador del Programa “Jóvenes Investigadores e Innovadores” de Colciencias en año 2012 y 2014. Docente del programa de Ingeniería Eléctrica y miembro del Grupo de Investigación en Sistemas Energéticos de la Universidad de Pamplona, Colombia.

J. L. Díaz Rodríguez.Ms.C Investigador Asociado. Profesor Titular.Director del Departamento de Ingeniería Eléctrica, Electrónica, Sistemas y Telecomunicaciones.Director del Grupo de Investigación en Sistemas Energéticos la Universidad de Pamplona, Colombia.

A. Pardo García.Ph.D. Investigador Senior. Profesor Titular. Director de la Maestría en Controles Industriales. Director del Grupo de Investigación de Automatización y Control.Universidad de Pamplona.