

Filtro activo de potencia para compensar la distorsión armónica de un sistema fotovoltaico autónomo

CABALLERO, Carlos*†, CORTEZ, Liliana, MUÑOZ, German, CASTAÑEDA, Josefina.

Recibido Febrero 15, 2016; Aceptado Octubre 07, 2016

Resumen

El objetivo del presente trabajo es diseñar, construir e implementar un filtro activo de potencia para mitigar la distorsión armónica presente en un sistema fotovoltaico autónomo (SFV). La implementación y la explotación de los SFV Autónomos han puesto en evidencia sus efectos en la calidad de energía debido a que el inversor de un SFV puede introducir armónicos de corriente con las que provoca un mal funcionamiento de las cargas y la reducción de su vida útil. Para solucionar este problema, en este trabajo se plantea la implementación de un filtro activo de potencia, cuya función principal es generar una señal de compensación que corresponde a las armónicas no deseadas e inyectarlas con una fase inversa para mitigar dichas armónicas. Se desarrolló el filtro activo con una potencia de 1.5kW, que incluye las etapas de sensado de las señales, procesamiento digital de las señales, modulación y control del filtro activo con base de la teoría de la potencia instantánea. Después de dimensionar los elementos del filtro activo, se realizó su simulación e implementación.

Filtro activo de potencia, calidad de la energía, distorsión armónica, inversor monofásico.

Abstract

The objective of this work is to design, build and implement an active power filter to mitigate harmonic distortion present in an autonomous photovoltaic system (PVS). Implementation and exploitation of PVS have shown their effects on power quality because the investor of a PVS can introduce current harmonics causing malfunction on the loads and reducing its service life. To solve these problems, in this paper suggest the implementation of an active power filter, whose main function is to generate a compensation signal corresponding to the unwanted harmonics and inject them with a reverse phase to mitigate the arise of these harmonic. An active filter with 1.5kW of output was developed, it includes the steps of sensing signals, digital signal processing, modulation and control of the active filter based on the theory of instantaneous power. After sizing component of active filter is simulation and implementation was performed.

Active power filter, power quality, harmonic distortion, single-phase invertir.

Citación: CABALLERO, Carlos, CORTEZ, Liliana, MUÑOZ, German, CASTAÑEDA, Josefina. Filtro activo de potencia para compensar la distorsión armónica de un sistema fotovoltaico autónomo. Revista Tecnología e Innovación 2016, 3-9 : 76-84

*Correspondencia al Autor (Correo Electrónico: ccaballero@itla.edu.mx)

† Investigador contribuyendo como primer autor.

Introducción

La necesidad de contar con fuentes de energía no contaminantes es urgente, esto ha incrementado el interés por las fuentes de energía renovable, entre estas destacan los sistemas fotovoltaicos (SFV), que en los últimos años se ha incrementado su implementación en sistemas de mediana y pequeña potencia .

La implementación y la explotación de los SFV han puesto en evidencia sus efectos en la calidad de energía. En los sistemas fotovoltaicos autónomos (SFVA) la calidad de la energía depende únicamente del sistema que se tiene instalado. El inversor de un SFV puede introducir armónicos en la red eléctrica que provocan mal funcionamiento de las cargas y la reducción de su vida útil.

Un ejemplo de estos sistemas fotovoltaicos autónomos figura 1 es el instalado en el laboratorio de investigación de sistemas digitales y energías renovables (LISDER) perteneciente a la Facultad de Ciencias de la Computación (FCC) de la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla BUAP.



Figura 1 Sistema fotovoltaico autónomo.

El SFV instalado consiste en 3 subsistemas, cada subsistema contiene 6 paneles solares de 130 W c/u, para dar una potencia total instalada de 780 W por subsistema. Cada subsistema cuenta con 2 baterías en configuración a 12 VCD. La energía generada por subsistema es de 3.5 KWh/día que es enviada a un controlador de carga y pasa a un banco de baterías. El inversor se encarga de realizar la transferencia de energía [2].

Este SFV tiene la potencia necesaria para dotar al laboratorio de suministro eléctrico autónomo, pero al alimentar el laboratorio con el suministro fotovoltaico las cargas sensibles instaladas en el laboratorio dejan de funcionar o funcionan de forma incorrecta, es por esta razón, que se examinó el suministro eléctrico fotovoltaico con un analizador de calidad de la energía. Las mediciones obtenidas se pueden ver en la figura 2 y la figura 3.

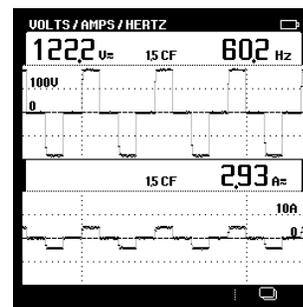


Figura 2 Voltaje y corriente de un subsistema

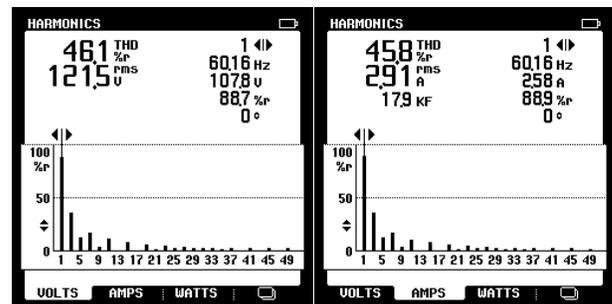


Figura 3 Distorsión armónica total de voltaje y corriente.

Las mediciones se realizaron conectado una carga puramente resistiva de 1KW. Como se puede observar en la figura 2, el voltaje y la corriente no son sinusoidales, presentan una distorsión en su forma de onda y en la figura 3 podemos notar que la distorsión armónica total presente en el voltaje y la corriente es aproximadamente del 46%, es por eso que se determinó que el mayor problema del suministro fotovoltaico son los armónicos, debido a la forma de onda que entrega el inversor.

Para solucionar el problema que se tiene en el laboratorio se propone implementar un filtro activo de potencia. En las siguientes secciones se describe el funcionamiento del filtro activo, sus topologías, la manera en que genera la señal de compensación, el dimensionamiento del filtro activo para un prototipo de 1.5KW de potencia y su instrumentación.

Solución para compensar armónicos

Generalmente, para solucionar los problemas de armónicos en la red se emplean acondicionadores de señal que van desde los filtros pasivos sintonizados hasta los filtros activos. Si bien, los primeros son más económicos, su selectividad no les permite compensar más allá de su frecuencia sintonizada.

Los filtros activos presentan una solución dinámica que se ajusta a las necesidades de compensación.

Los filtros activos se pueden clasificar según su conexión a la red, puede ser en serie o paralelo con la carga.

Los filtros activos de corriente o filtros activos paralelo, eliminan de la red eléctrica la circulación de armónicos de corriente no deseadas y compensan el factor de potencia de la carga. En la figura 4 se ilustra el diagrama equivalente del filtro activo de corriente, modelado como una fuente de corriente.

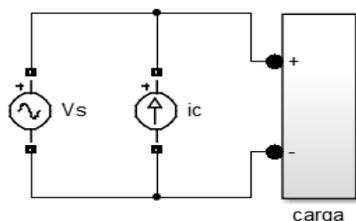


Figura 4 Filtro activo de corriente

Los filtros activos de voltaje o filtro activo serie cancelan armónicos de tensión presentes en la red, logrando que la corriente de línea sea sinusoidal, haciendo que el voltaje en el punto de conexión común también lo sea. En la figura 5 se muestra el diagrama equivalente para un filtro activo de tensión, modelado como una fuente de tensión.

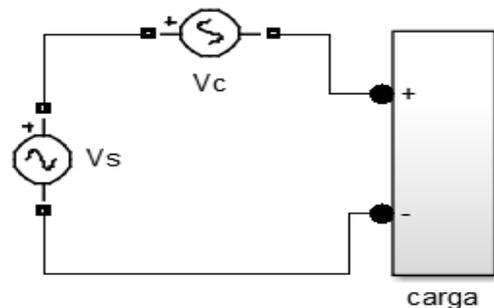


Figura 5 Filtro activo de voltaje

En este trabajo se propone emplear el filtro activo serie por su principal objetivo de eliminar armónicos de tensión, que logra que tanto la corriente como el voltaje sean de forma sinusoidal, la topología de este sistema se muestra en la figura 6, constituida básicamente por un bus de CD, un inversor puente completo, un filtro de salida y un transformador compensador.

Esta topología del filtro activo se puede representar como una fuente de tensión, capaz de proporcionar entre las terminales del transformador compensador la tensión necesaria para atenuar las perturbaciones que no se desean en la red eléctrica, esto se logra mediante una adecuada generación de la señal de compensación y tiene la capacidad de poder generar cualquier señal de tensión mediante un adecuado patrón de conmutación.

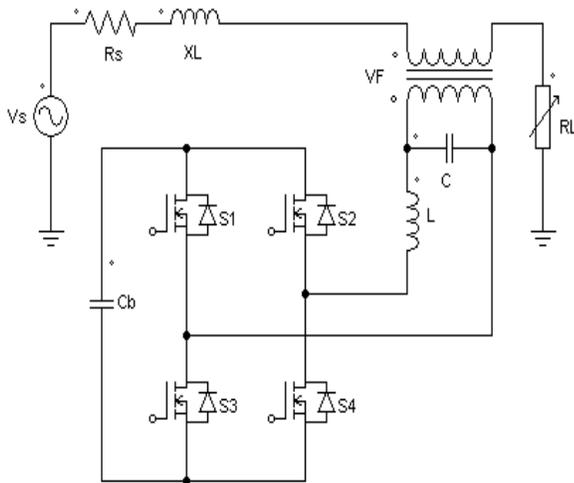


Figura 6 Filtro activo serie propuesto.

Dimensionamiento del filtro activo

Para dimensionar los dispositivos del filtro activo para un prototipo que se conecta a un sistema de 1.5KW es conveniente hacerlo con un margen de tolerancia suficiente para que funcione con seguridad.

Los argumentos de diseño que se emplean en esta sección son la tensión y la corriente que maneja ésta etapa [6].

Transformador compensador. El filtro activo se conecta en serie a través de un transformador compensador modelado como un transformador de corriente.

Para una tensión de base de $V_S=120\text{ V}$ y para una potencia base de $P_B=1.5\text{ KW}$, se obtiene una corriente base $I_S = P_B/V_S = 12.5\text{ A}$.

La relación del transformador se elige de tal manera, para que el inversor maneje más tensión y menos corriente, para una relación de transformación de 10:1 con una potencia de carga de 1.5KW, la tensión que debe soportar el transformador es de 240 V y la corriente es de 6.25 A.

Inversor. En el filtro activo se emplea inversores o convertidores CD/CA con estructura puente completo, en la selección de los dispositivos semiconductores que se emplean, se necesita calcular la corriente que deben soportar para manejar la potencia de la fase ante la tensión de salida deseada, por lo tanto es necesario conocer la carga que demande esa potencia.

Se considera la potencia del transformador $P_T = 1500\text{ W}$, pero como un primer margen de seguridad se considera para el inversor una potencia $P_F = 3000$ y una tensión $V_F = 120$, por lo tanto el valor de la carga.

$$Z_F = \frac{(V_F)^2}{P_F} = \frac{(120)^2}{3000} = 4.8\ \Omega \quad (1)$$

Con la carga se puede calcular la corriente pico y esta es la corriente que debe soportar los dispositivos

$$I_{cp} = \frac{V_{CD}}{Z_L} = \frac{\sqrt{2}(120)}{4.8} = 35.35\text{ A} \quad (2)$$

Filtro de salida LC. A la salida del filtro activo se tiene una señal modulada por ancho de pulso (PWM por sus siglas en ingles) que contiene la información necesaria que se desea reproducir, sin embargo también contiene una componente de alta frecuencia debido a la conmutación de los dispositivos del inversor. Para eliminar la señal de alta frecuencia se emplea un filtro pasivo LC como se observa en la figura 7

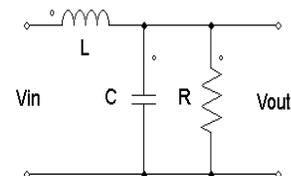


Figura 7 Filtro de segundo orden RLC.

La función de transferencia para el filtro LC está definida por la ecuación 3.

$$H(s) = \frac{\omega_o^2}{s^2 + s\frac{\omega_o}{Q} + \omega_o} \quad (3)$$

Dónde:

ω_o es la frecuencia de resonancia

$$\omega_o = \sqrt{\frac{1}{LC}} \quad (4)$$

Q es el factor de calidad del filtro

$$Q = R\sqrt{\frac{C}{L}} \quad (5)$$

Para el cálculo de la inductancia y la capacitancia, se debe conocer la frecuencia de corte la cual la estimamos en $F_{corte} = 10$ kHz, que es la frecuencia del PWM y así se puede conocer la frecuencia angular ω_{cf} .

$$\omega_{cf} = 2\pi F_{corte} = 2\pi(10kHz) = 62831.85 \text{ r/s} \quad (6)$$

A partir de este resultado, empleando la ecuación 4 se tiene que

$$LC = \frac{1}{(\omega_{cf})^2} = 1.5915 \times 10^{-5} \quad (7)$$

De la ecuación 7 se propone un valor de capacitor comercial $C=100\mu F$, por lo tanto al sustituir en la ecuación 6 se tiene:

$$L = \frac{1.5915 \times 10^{-5}}{1000 \times 10^{-6}} = 15.915 \times 10^{-3} \approx 16 \text{ mH} \quad (8)$$

Bus de CD. Es necesario dimensionar el condensador con un valor óptimo, que permita mantener la tensión de salida en un nivel adecuado entre las variaciones de carga, para el cálculo del condensador se utiliza la ecuación de la energía asociada a la potencia por el tiempo.

$$E_{in} = S_{in}T \quad (9)$$

También se puede expresar en función de la frecuencia

$$E_{in} = \frac{S_{in}}{f} \quad (10)$$

Dónde:

E_{in} es la energía del inversor
 S_{in} es la potencia del inversor
 f es la frecuencia del sistema

Se puede relacionar la energía con el valor del condensador y de la tensión como

$$E_{in} = \frac{1}{2} CV^2 \quad (11)$$

De la ecuación 11 se puede considerar un porcentaje para el rizo de tensión presente en el bus:

$$E_{in} = \frac{1}{2} C_b (V_{max}^2 - V_{min}^2) \quad (12)$$

Dónde:

- C_b es el valor del condensador del bus.
- V_{max} es el valor de tensión máximo deseado.
- V_{min} es el valor de tensión mínimo deseado.

Considerando una potencia máxima de 3000 VA y que en el sistema la mitad del ciclo entrega energía y la otra mitad recibe energía para la frecuencia de la señal fundamental $f=60\text{Hz}$, se obtiene de la ecuación 10.

$$E_{in} = \frac{1 S_{in}}{2 f} = \frac{1(3000)}{2(60)} = 25J \quad (13)$$

Para un valor máximo del bus de CD de 240V y para un rizado de tensión de 1.6%, se tiene

$$V_{max} = 240 \text{ V} + 1.6\% = 243.84 \text{ V} \quad (14)$$

$$V_{min} = 240 \text{ V} - 1.6\% = 236.16 \text{ V} \quad (15)$$

Por lo que de las ecuaciones 12, 13, 14 y 15 se obtiene el valor del capacitor

$$C_b = \frac{2E_{in}}{(V_{max}^2 - V_{min}^2)} = 13.57 \text{ mF} \quad (16)$$

Generación de la señal de compensación

La teoría de compensación es la metodología más utilizada para obtener la corriente de referencia, que inyectada en el punto de conexión anula los efectos armónicos en la red. A continuación, se describe la teoría de compensación que será implementada en el controlador del filtro activo.

Teoría de la potencia instantánea monofásica. La teoría pq monofásica se usa para compensar la potencia reactiva instantánea de cada una de las fases de un sistema trifásico, de forma independiente [8]. La idea básica de la teoría pq original, comienza con la transformación de los vectores espaciales instantáneos de las tensiones de fases (17) y corrientes de carga (18).

$$\begin{bmatrix} v_{\alpha}(t) \\ v_{\beta}(t) \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -0.5 & -0.5 \\ 0 & \sqrt{3}/2 & -\sqrt{3}/2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_a(t) \\ v_b(t) \\ v_c(t) \end{bmatrix} \quad (17)$$

$$\begin{bmatrix} i_{\alpha}(t) \\ i_{\beta}(t) \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -0.5 & -0.5 \\ 0 & \sqrt{3}/2 & -\sqrt{3}/2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a(t) \\ i_b(t) \\ i_c(t) \end{bmatrix} \quad (18)$$

La potencia real instantánea, $p(t)$ y la potencia imaginaria, $q(t)$ se definen como:

$$\begin{bmatrix} p(t) \\ q(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_{\alpha}(t) & v_{\beta}(t) \\ -v_{\beta}(t) & v_{\alpha}(t) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{\alpha}(t) \\ i_{\beta}(t) \end{bmatrix} \quad (19)$$

De la ecuación 19 las corrientes de compensación de referencia en coordenadas α - β , $i_{comp\alpha}$ e $i_{comp\beta}$ están dadas por:

$$\begin{bmatrix} i_{comp\alpha}(t) \\ i_{comp\beta}(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_{\alpha}(t) & v_{\beta}(t) \\ -v_{\beta}(t) & v_{\alpha}(t) \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} 0 \\ -q(t) \end{bmatrix} \quad (20)$$

Transformando estas corrientes en a-b-c el resultado que se tiene es:

$$\begin{bmatrix} i_{compa}(t) \\ i_{compb}(t) \\ i_{compc}(t) \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -0.5 & \sqrt{3}/2 \\ -0.5 & \sqrt{3}/2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{comp\alpha}(t) \\ i_{comp\beta}(t) \end{bmatrix} \quad (21)$$

Donde, $i_{compa}(t)$, $i_{compb}(t)$ e $i_{compc}(t)$ son las corrientes de compensación en cada una de las fases A, B y C. Considerando un sistema trifásico con carga monofásica en una sola de sus fases, en la fase a, es posible escribir la siguiente expresión:

$$i_b(t) = i_c(t) = 0$$

Sustituyendo la ecuación 19 en la ecuación 20 se tiene:

$$\begin{bmatrix} i_{comp\alpha}(t) \\ i_{comp\beta}(t) \end{bmatrix} = \frac{v_{\beta}(t)}{v_{\alpha}^2(t) + v_{\beta}^2(t)} \begin{bmatrix} -v_{\beta}(t)i_{\alpha}(t) \\ v_{\alpha}(t)i_{\alpha}(t) \end{bmatrix} \quad (22)$$

Teniendo en cuenta la transformación de las ecuaciones en coordenadas α - β a coordenadas a-b-c, se tiene la siguiente expresión para corriente y voltaje en el eje α :

$$i_{\alpha}(t) = \sqrt{\frac{2}{3}}i_a(t); \quad v_{\alpha}(t) = \sqrt{\frac{2}{3}}v_a(t) \quad (23); (24)$$

Por lo tanto, a partir de las ecuaciones 18, 20 y 21 tenemos.

$$i_{comp\alpha}(t) = \sqrt{\frac{2}{3}} \frac{v_{\alpha}(t)v_{\beta}(t)i_{\beta}(t) - v_{\beta}^2(t)i_{\alpha}(t)}{v_{\alpha}^2(t) + v_{\beta}^2(t)} \quad (25)$$

Teniendo en cuenta el hecho, de que las tensiones y las corrientes en el eje β están desfasadas $\pi/2$ respecto a las cantidades del eje α , es posible escribir las siguientes ecuaciones:

$$v_{\beta}(t) = -v'_{\alpha}(t); \quad i_{\beta}(t) = -i'_{\alpha}(t) \quad (26); (27)$$

Sustituyendo las expresiones de los voltajes y las corrientes en los ejes α - β en la ecuación 25 se tiene:

$$i_{comp\alpha}(t) = \frac{v_{\alpha}(t)v'_{\alpha}(t)i'_{\alpha}(t) - v'_{\alpha}{}^2(t)i_{\alpha}(t)}{v_{\alpha}^2(t) + v'_{\alpha}{}^2(t)} \quad (28)$$

La figura 8 muestra el circuito para obtener las corrientes de compensación, en esta figura $v(t)$, $i(t)$ e $i_{comp}(t)$ representan la tensión de la fase, la corriente de la carga y la corriente de compensación respectivamente.

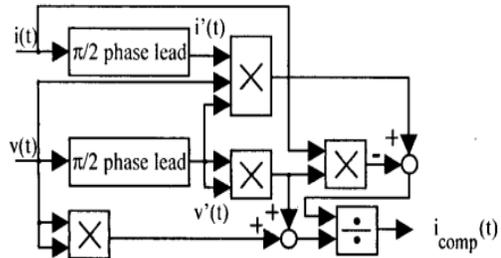


Figura 8 Bloque generador de señal de compensación.

Simulación

Una vez que se dimensionaron los componentes del filtro activo y se conoce la forma para generar la señal de compensación, se llevó a cabo su simulación mediante el software SIMULINK-MATLAB, como se observa en la figura 9. Esta simulación se realizó sobre una carga puramente resistiva.

Para generar la señal de compensación se toman las lecturas del voltaje y corriente. La etapa de control realiza el cálculo de la señal a compensar y a la salida de este se tiene una señal PWM, que sirve para activar los dispositivos del inversor del filtro activo, a la salida del filtro activo se tiene la señal a compensar y el transformador de acoplamiento la inyecta a la red.

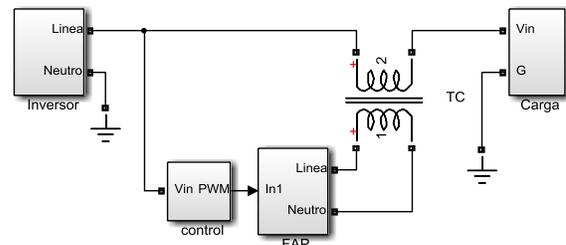


Figura 9 Circuito para compensación de armónicos.

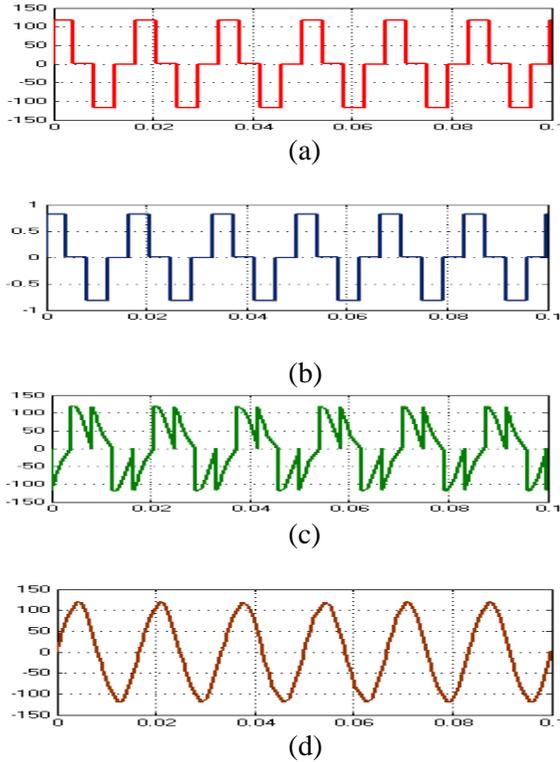
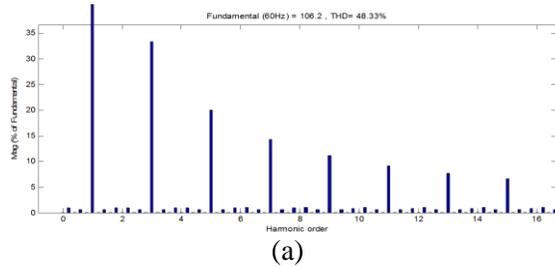
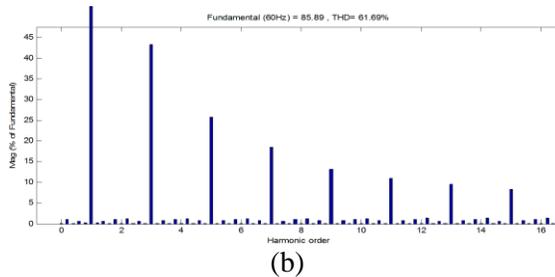


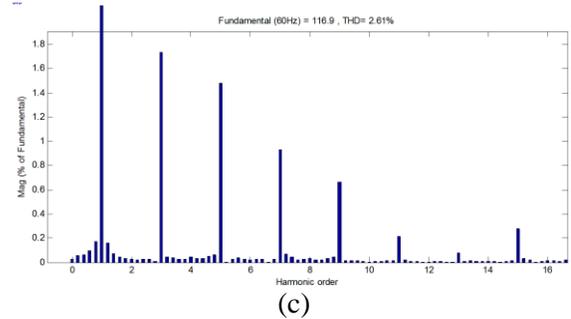
Figura 10 a) Voltaje de la fuente, b) corriente de la fuente, c) corriente de compensación, d) voltaje en la carga resistiva.



Fundamental (60Hz) = 106.2 , THD= 48.33%



Fundamental (60Hz) = 85.89 , THD= 61.69%



Fundamental (60Hz) = 116.9 , THD= 2.61%

Figura 11 a) Distorsión armónica en el voltaje de la fuente, b) distorsión armónica en la señal de compensación, c) distorsión armónica en el voltaje de la carga resistiva.

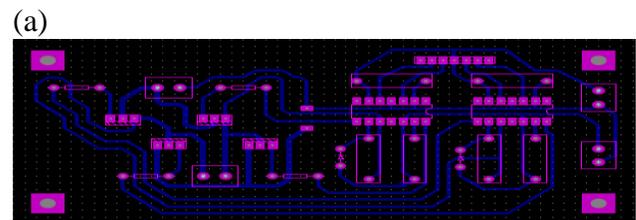
Como se puede observar en la figura 10(d) al inyectar la señal de compensación, producida por el filtro activo figura 10 (c), el voltaje en la carga obtiene una forma sinusoidal.

De la figura 11(c) podemos observar que el contenido armónico se reduce a un 2.61% a comparación de la distorsión inicial que era de un 48.33% figura 11(a).

Con la reducción de los armónicos en voltaje se cumple, con la norma IEEE 596 americana y la norma CFE L0000-45 mexicana, que establecen el límite de armónicos presentes en la red eléctrica de voltaje menor al 5% [9].

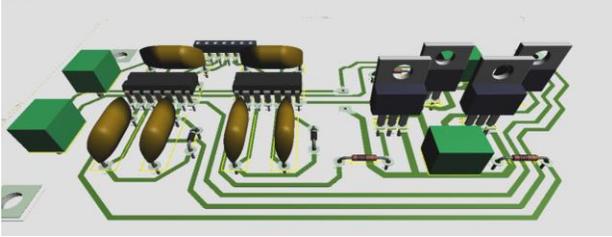
Instrumentación del filtro activo

Una vez validados en simulación los valores calculados para el dimensionamiento del filtro activo, se prosiguió con su instrumentación, en las siguientes figuras se presenta el diseño que se ha realizado en el software *ARES-PROTEUS*, en el cual se desarrolló los circuitos impresos para el filtro activo.



CABALLERO, Carlos, CORTEZ, Liliana, MUÑOZ, German, CASTAÑEDA, Josefina. Filtro activo de potencia para compensar la distorsión armónica de un sistema fotovoltaico autónomo. Revista Tecnología e Innovación 2016, 3-9 : 76-84

(b)



(c)

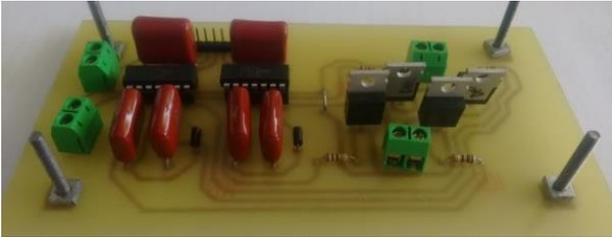


Figura 12 a) diseño de las pistas del inversor del filtro activo, b) representación de los componentes del inversor y su circuito de disparo, c) circuito físico ya instrumentado.

Conclusiones

En el presente trabajo se diseñó el filtro activo de potencia, incluyendo las etapas de sensado de la señal y el procesamiento digital de señales para obtener la señal de compensación con base de la teoría de la potencia instantánea. Como resultado de la implementación del filtro activo se demostró en simulación la reducción del contenido armónico de 48.3% originalmente a 2.61%, con lo que se cumple con la norma IEEE596 americana y L0000-45 mexicana.

La relevancia de resolver el problema de los armónicos en el suministro fotovoltaico, radica en el aprovechamiento del SFV instalado en LISDER, de no tener problemas al utilizar los equipos sensibles a la distorsión armónica.

Solucionar un problema real que puede presentarse en cualquier sistema fotovoltaico autónomo de mediana y baja potencia. Con base al aprovechamiento de la energía renovable se puede sustituir el consumo tradicional de CFE.

Referencias

Díaz y Carmona. (2013). Instalaciones solares fotovoltaicas.GM. España: McGraw-Hill.

LISDER. (2014). Manual Sistema Fotovoltaico Instalado.

Rashid. (3Ed). (2011). Power electronics handbook. USA: Elsevier.

Dugan y Macgrhanagan. (2DA). (2004). Electrical power system quality, USA: McGraw-Hill.

Djeghloud, Larakeb y Bentounsi. (2014). Laboratory implementation of a hybrid series active power filter system part II: series active filter desing. IEEE power electronics and motion control conference and exposition.

Patricio. (2015). Diseño de un inversor de conexión a la red para paneles fotovoltaicos. Escuela politécnica nacional. España.

Akagi y Nabae. (1996). Control strategy of active power filters using multiple voltaje-source PWM converters. IEEE transactions on industry applications.

Haque y Azan. (2002). Single-phase pq theory for active filters. IEEE conference on computer, communications, control and power engineering.

IEEE std 519-1992. (1993). IEEE recommended practices and requirements for harmonic control in electrical power systems. IEEE.