

Filtro activo de potencia paralelo, descripción y relaciones de impedancia

Shunt active power filter, description and impedance relationships

Odair Trujillo - Orozco^{a*}

Recibido: abril 24 de 2014
Recibido con revisión: mayo 27 de 2014
Aceptado: junio 16 de 2014

^{a*} Universidad Nacional de Colombia,
Sede Manizales, Facultad de
Ingeniería y Arquitectura
Km. 7 Vía Aeropuerto, Edificio Q
Manizales, Caldas, Colombia
oatrujillo@unal.edu.co
Tel.: +(57) 3008907950

Energética 43, junio (2014), pp. 91-98

ISSN 0120-9833 (impreso)
ISSN 2357 - 612X (en línea)
www.revistas.unal.edu.co/energetica
© Derechos Patrimoniales
Universidad Nacional de Colombia



RESUMEN

El filtro activo de potencia paralelo es el filtro activo de potencia más extendido en la industria. Sin embargo este tiene un pobre rendimiento cuando trata de compensar la corriente de una carga no lineal de baja impedancia, como por ejemplo rectificadores con capacitor electrolítico del lado DC. Esas cargas son las más usadas en la industria ya que usualmente son la primera etapa de los variadores de velocidad y otros dispositivos ampliamente extendidos hoy en día, basados en electrónica de potencia. Además de describir el funcionamiento y composición general de un filtro activo paralelo, este artículo muestra las ecuaciones que revelan dichos problemas, y resultados de simulación que validan este enfoque analítico; mostrando también que bajo pobres condiciones de operación, este tipo de filtro no alcanza los niveles de ahorro de energía eléctrica esperado.

PALABRAS CLAVE

Relación de impedancia; efectos de la impedancia; filtro activo de potencia paralelo; ecuaciones de red.

ABSTRACT

The Shunt Active Power Filter is the most wide extended active power filter in the industry. Perhaps it has a poor performance when it is trying to compensate the current of a low impedance nonlinear load, such as rectifiers with smooth dc capacitor. These loads are the most used loads in industry, because are the first power step in adjustable speed drivers and other power electronics devices extended nowadays. Additionally to the description of the operation and general composition of a Shunt Active Power Filter, this paper shows the equations that reveal such issues, and simulation results that validate this analytical approach; also showing that under poor operation conditions, this kind of filter does not reach the expected electric energy savings.

KEYWORDS

Impedance relationship; impedance effects; shunt active power filter; network equations.

1. INTRODUCCIÓN

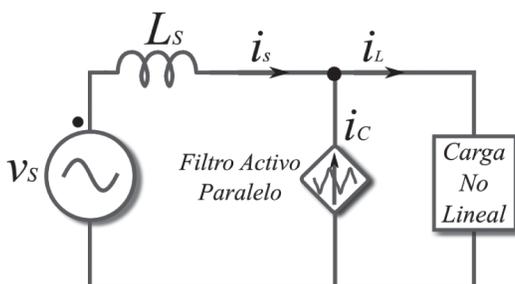
A nivel mundial, la industria ha migrado progresivamente hacia el uso de dispositivos de electrónica de potencia para reemplazar aquellos dispositivos voluminosos como transformadores, inductores de choque, capacitores y esquemas de accionamientos del tipo electromecánico; que se han encargado de realizar funciones de arranque, cambio de giro, variación de velocidad, entre otras.

Mucho se ha discutido sobre el efecto que tiene la operación de equipos basados en electrónica de potencia, sobre la calidad de las formas de onda que se entregan a la red de distribución [Arrillaga & Watson, 2003; Bollen & Gu, 2006; Ramírez & Cano, 2006; Cano & Tacca, 2008].

En esta dinámica, los filtros activos de potencia (FAP) basados también en electrónica de potencia, aparecen en el escenario como fuego contra fuego, para resolver el problema de la creciente contaminación armónica; en especial aquella producida por la industria. De ellos el FAP Paralelo o SAPF por sus siglas en inglés, ha sido el FAP más extendido debido a que su acople al punto de conexión común (PPC) es más simple; el flujo de potencia principal no circula a través de ninguno de sus elementos, lo que hace su dispositivo de acople mucho más pequeño que el de otras soluciones, como por ejemplo el Filtro Activo de Potencia Serie, en el cual todo el flujo de potencia debe circular por el dispositivo de acople del filtro, lo cual reduce la confiabilidad del sistema.

Algunos autores argumentan que los filtros activos pueden reducir los consumos tanto de potencia reactiva o no activa, como de potencia activa [Zhao, et al., 2011; Gurguiatu, et al., 2013], ya que eliminan las corrientes armónicas que circulan por los conductores y por los devanados de los transformadores; reduciendo el calor generado en los mismos. Sin embargo, esto no es del todo cierto, ya que como se demostrará a continuación, el FAP Paralelo puede llegar a tener grandes pérdidas de energía en sus elementos, debidas al efecto Joule.

Figura 1. Conexión del FAP Paralelo

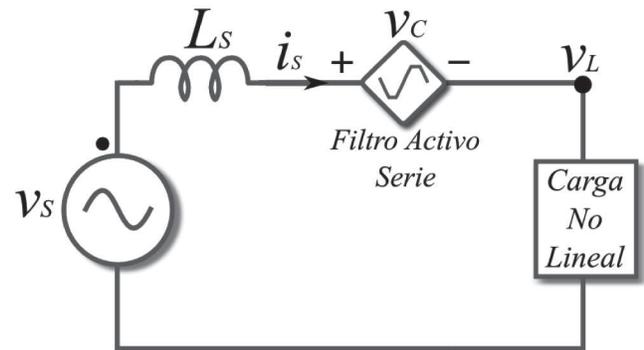


En las Figuras 1 y 2, se puede apreciar el esquema de

Fuente. Elaboración propia.

conexión de ambos tipos de FAP.

Figura 2. Conexión del FAP Serie



Fuente. Elaboración propia.

Sin embargo, a pesar de sus ventajas comparativas, el FAP Paralelo es muy dependiente de las condiciones de impedancia de la red, en especial con respecto al tipo de carga que se trata de compensar.

Las consideraciones expuestas por [Peng, 1998] demuestran este problema. Se pretende entonces desarrollar con mayor detalle el comportamiento del FAP Paralelo partiendo de una descripción detallada del mismo.

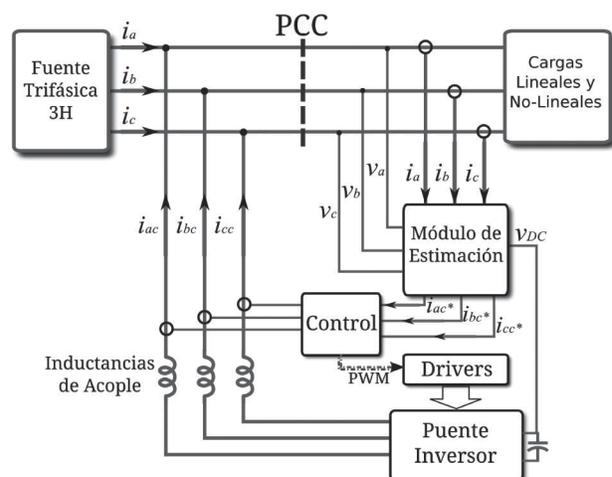
2. EL FILTRO ACTIVO DE POTENCIA PARALELO

A continuación se describirá la idea fundamental del filtro y el funcionamiento detallado de cada uno de sus módulos.

2.1 Esquema

En la Figura 3 se puede apreciar con claridad los módulos que componen el sistema completo en el que opera un FAP Paralelo.

Figura 3. Esquema general de un FAP Paralelo

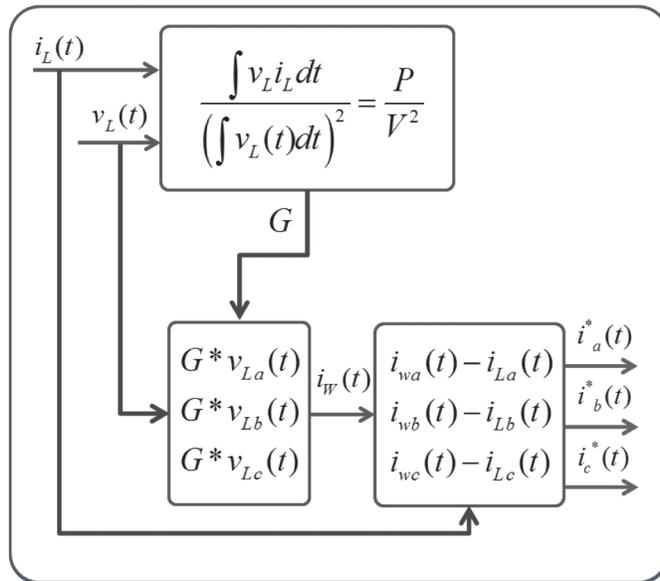


Fuente. Elaboración propia.

2.2 Módulo de Estimación

Es la parte encargada de determinar las funciones que el FAP cumple. Dependiendo de la función objetivo, en este módulo se programarán las estrategias de estimación que permitan alcanzarla. Este módulo producirá la corriente de referencia a unos pocos miliamperios, que luego tendrá que ser generada por el inversor para ser inyectada en el PCC.

Figura 4. Módulo de estimación - Fryze



Fuente. Elaboración propia.

En la Figura 4 se muestra la estrategia de estimación, extrayendo la corriente de referencia por medio de la teoría de potencia de Fryze [Karuppanan, et al., 2011], cuya función objetivo es obtener la corriente debida a la potencia activa que consume la carga, para luego restarla de la corriente total de la carga y así obtener la corriente debido a potencia no activa; lo que incluye las corrientes armónicas.

En los trabajos de [Montero, et al., 2007; Santos, et al., 2009] y, se puede encontrar mayor detalle sobre las estrategias de estimación más usadas.

2.3 Módulo de Control

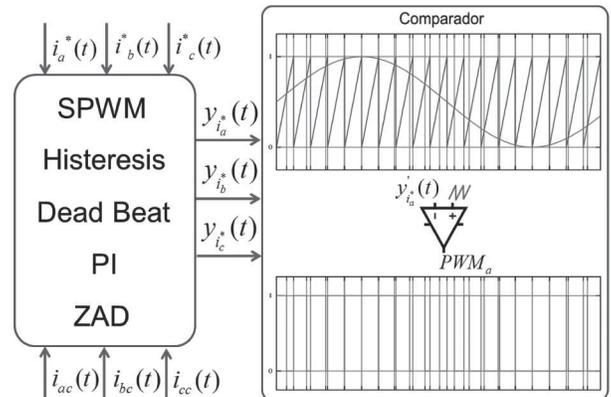
Se encarga de manejar el lazo de control del inversor, recibe la corriente de referencia que ha sido generada por el módulo de estimación y censa la corriente que genera el puente inversor después de sus bobinas de acople. Esta última es la corriente que se inyecta en el PCC.

Como se muestra en la Figura 5, es posible usar casi cualquier técnica de control disponible. Los trabajos realizados por [Caceres, et al., 2010; Zhang et al., 2010], tratan con mayor detalle estas técnicas y se realizan comparativos de gran utilidad.

Por tanto, este módulo se encargara de generar el

PWM que finalmente comandará la etapa de Drivers del puente inversor.

Figura 5. Módulo de control



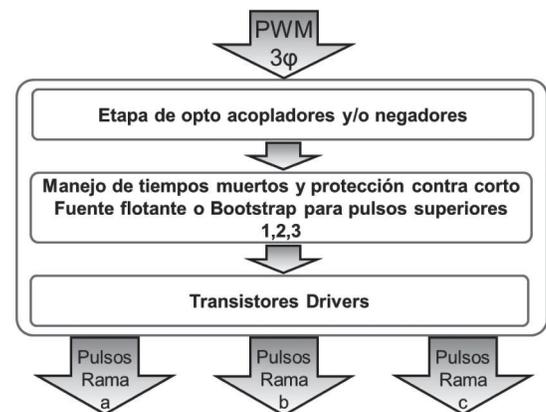
Fuente. Elaboración propia.

2.4 Etapa de Drivers

Cuando el módulo de control ha generado el PWM, todos los comandos necesarios para que el filtro realice su función objetivo, deben ser recibidos por los Drivers que en última instancia comandarán el encendido o apagado de los dispositivos de conmutación que componen el puente inversor.

En la Figura 6, se puede ver el flujo que deben seguir los comandos de conmutación para lograr el disparo adecuado de los dispositivos. Evitando en todo caso que halla solapamiento de la llave superior con la llave inferior en cada rama, para evitar cortos; esto se logra incluyendo tiempo muerto.

Figura 6. Etapa de drivers.

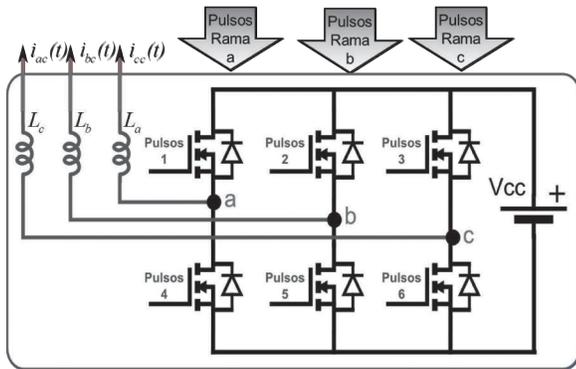


Fuente. Elaboración propia.

2.5 Punte Inversor

La corriente de referencia que se generó en el módulo de estimación, es una señal con la amplitud de la red en Voltios y apenas algunos microamperios, esta debe ser reproducida con la magnitud necesaria para equipararse a las corrientes que fluyen a través del PCC. En la Figura 7, se puede apreciar como los comandos entregados por la etapa de drivers, pueden hacer fluir una corriente a través de los inductores de acople hacia el PCC.

Figura 7. Inversor trifásico y acople inductivo



Fuente. Elaboración propia.

En esta imagen, la fuente V_{CC} puede ser un capacitor o una batería. En caso de ser un capacitor, es necesario agregar el control de la tensión en el mismo, en el módulo de estimación [Choi, et al., 2013]. Si es una batería, esta deberá estar alimentada desde una fuente externa de energía, como paneles foto voltaicos o aerogeneradores [Pontoriero & Mercado, 2001].

3. ECUACIONES

Si se modela el filtro activo como una fuente dependiente de corriente I_C , tal que su ganancia corresponda a la capacidad que tenga el mismo de generar la corriente de corrección adecuada, en la mayor sincronía posible con lo que sucede en el sistema; es posible encontrar ecuaciones sencillas en el dominio de $j\omega$, que describan la relación del filtro con el sistema que este trata de compensar.

$$I_C = I_L G \tag{1}$$

Aquí la ganancia G incluye el módulo de estimación y de control con los retardos inherentes al procesamiento digital de las señales y el retardo debido a la propia estrategia de estimación. Adicionalmente, existe un retardo en la respuesta de conmutación del puente inversor, ya que la tensión PWM que este genera debe ser transformada en corriente por los inductores de acople. Si la función objetivo es compensar armónicos, esta ganancia está definida con la siguiente ecuación.

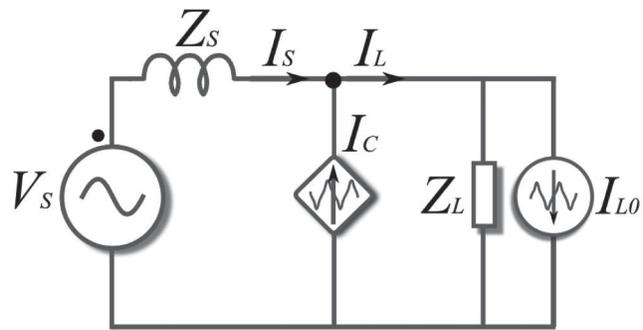
$$G = \begin{cases} |G|_f = 0 \\ |G|_h = 1 \end{cases} \tag{2}$$

De esta forma G extrae la corriente armónica y rechaza la corriente fundamental. Sin embargo, si la función objetivo del filtro requiere compensar reactivos, entonces el término $|G|_q = 1$ debe ser agregado a 2 y por ende tenido en cuenta en la estrategia de estimación usada

3.1 Con carga distorsionadora de corriente

El circuito equivalente para una carga distorsionadora de corriente, como por ejemplo un rectificador completamente controlado con inductor para filtrar el rizado de corriente DC; se muestra en la figura 8.

Figura 8. FAP con carga distorsionadora de corriente



Fuente. Elaboración propia.

Planteando la Ley de Corrientes de Kirchoff (LCK) en el PCC, se llega a 3, 4 y 5.

$$I_s = I_L - I_C \tag{3}$$

$$I_s = \frac{Z_L}{Z_s + \frac{Z_L}{1-G}} I_{L0} + \frac{V_s}{Z_s + \frac{Z_L}{1-G}} \tag{4}$$

$$I_L = \frac{\frac{Z_L}{1-G}}{Z_s + \frac{Z_L}{1-G}} I_{L0} + \frac{1}{1-G} \frac{V_s}{Z_s + \frac{Z_L}{1-G}} \tag{5}$$

Desde el punto de vista de los armónicos, de 4 se deduce que para llevar las corrientes armónicas de la fuente a cero ($I_{Sh} = 0$), es necesario que se cumpla la condición dada por la siguiente desigualdad.

$$\left| \frac{Z_L}{1-G} \right|_h \gg |Z_s|_h \tag{6}$$

De tal forma que Z_s sea despreciable. Y considerando lo dicho en 2; 4 y 1 se reducen a:

$$I_C \approx I_{Lh} \tag{7}$$

$$I_{sh} \approx (1-G)I_{Loh} + (1-G)\frac{V_{Sh}}{Z_L} \approx 0 \quad (8)$$

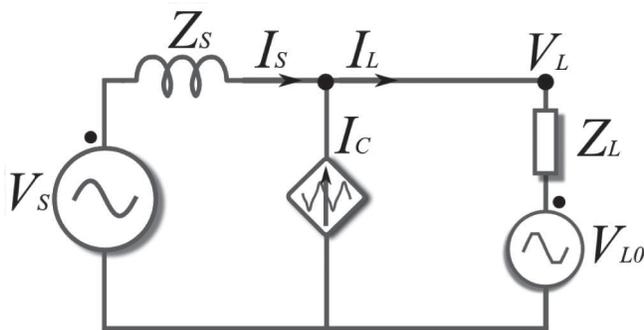
Para una carga distorsionadora de corriente, es fácil cumplir la condición dada en 6, ya que generalmente Z_L tiene un valor elevado y $|1 - G|$ se puede acercar a 0.1, ya que dependerá de la efectividad de la estrategia de estimación y la reducción de los retardos mencionados anteriormente. Así como del valor del inductor de acople.

Pero en la práctica, no se tiene una sola carga de este tipo, sino que se conectan otras cargas en paralelo que hacen que la impedancia Z_L se vea drásticamente reducida, lo que evitaría que 6 se cumpla, y debido los términos del lado derecho en 4 y 5, los armónicos de la fuente circulan por estas cargas adicionales y hagan entrar en resonancia los elementos pasivos de la red.

3.2 Con carga distorsionadora de tensión

El circuito equivalente para una carga distorsionadora de tensión, como por ejemplo un rectificador con capacitor electrolítico para filtrar el rizado de la tensión DC; se muestra en la Figura 9.

Figura 9. FAP con carga distorsionadora de tensión



Fuente. Elaboración propia.

Planteando la LCK en el PCC, se llega a 9,10 y a 11

$$I_s = I_L - I_c \quad (9)$$

$$I_s = \frac{V_s - V_L}{Z_s + \frac{Z_L}{1-G}} \quad (10)$$

$$I_L = \frac{V_s - V_L}{(1-G)Z_s + Z_L} \quad (11)$$

Desde el punto de vista de los armónicos, de 10 se deduce que para llevar las corrientes armónicas de la fuente a cero ($I_{Sh} = 0$), es necesario que se cumpla la condición dada por la siguiente desigualdad.

$$\left| Z_s + \frac{Z_L}{1-G_h} \right| \gg 1pu \quad (12)$$

De tal forma que el denominador en 10 sea proporcionalmente mucho mayor que el numerador. Y considerando lo dicho en 2; 10 y 1 se reducen a:

$$I_C \approx I_{Lh} \quad (13)$$

$$I_{sh} \approx 0 \quad (14)$$

En este caso cumplir la condición de 12 no es fácil, ya que generalmente para este tipo de carga $Z_L \approx 0$ y Z_S se encuentra al rededor de $0.1pu$. Por lo que las corrientes armónicas del filtro pueden fluir hacia la carga, lo que incrementaría los picos de corriente de la carga, así como los picos de corriente del filtro; haciendo necesario incrementar la capacidad en VA del FAP. En adición, el desempeño del filtro se ve drásticamente reducido, lo que se validará en la siguiente sección.

4. SIMULACIÓN

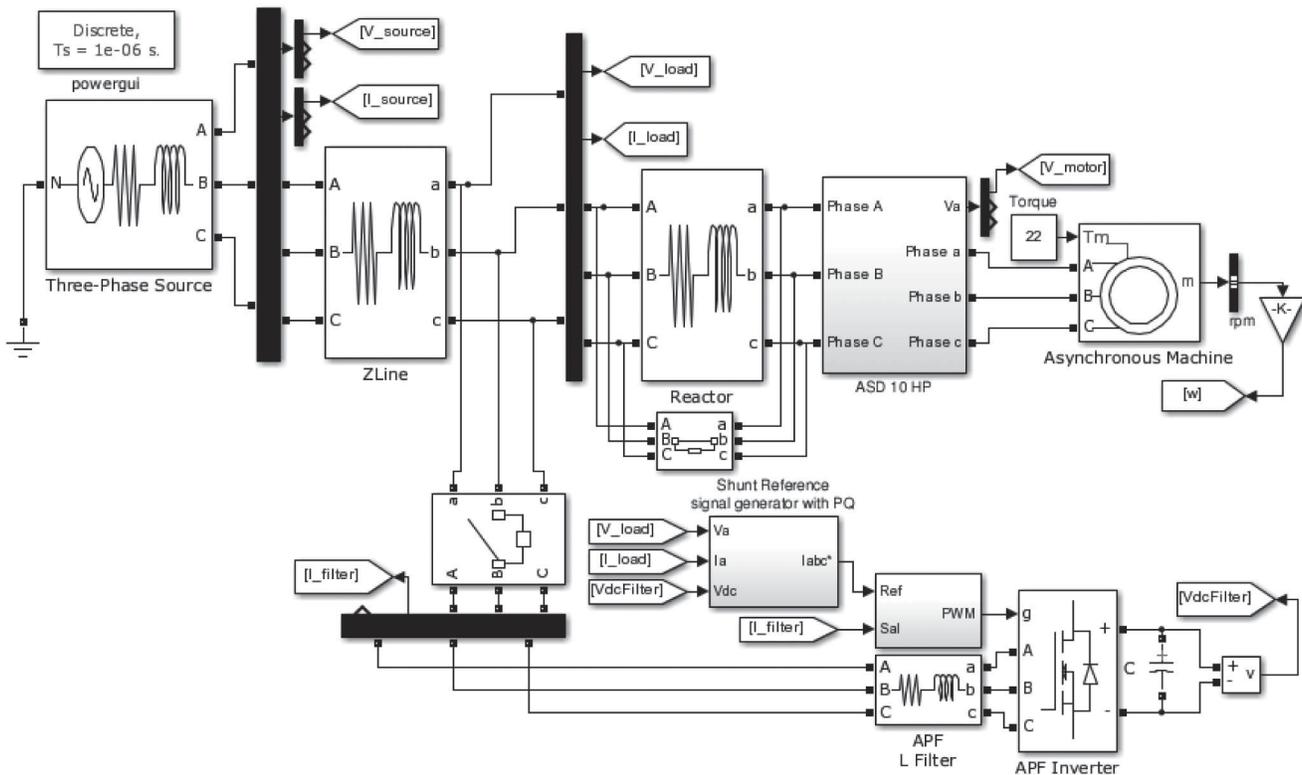
Debido al incremento de cargas no lineales del tipo de baja impedancia o correspondientes al modelo en fuente de tensión; o simplemente porque aquellas de alta impedancia generalmente se ven reducidas por la conexión de otras cargas en paralelo; la creciente situación es aquella que coincide con el comportamiento de una carga distorsionadora de tensión.

Por ello, se ha planteado la simulación de un variador de velocidad (ASD por sus siglas en inglés) de $10HP$; con un Filtro Activo Paralelo conectado en terminales del mismo, como se puede ver en la Figura 10. La impedancia del alimentador se ha incluido para enfocar la simulación a la carga y no a un conjunto de cargas conectadas al PCC. Los resultados de la Figura 10 se obtienen usando la estrategia de estimación con teoría PQ, control del bus DC por PID [Akagi, et al., 2007] y control de la corriente de referencia por Histéresis de frecuencia fija [Zhang, et al., 2010].

En la Figura 11, la tensión en el PCC (trazo azul) se ve distorsionada como es de esperarse para este tipo de carga. El filtro activo es encendido al cuarto ciclo de la onda. Desde este punto se puede apreciar como la corrección es inefectiva, la corriente de la fuente (trazo azul) aún no es sinusoidal, se siguen presentando fuertes picos y la tensión en bornes del variador (trazo verde) sigue distorsionada. De la misma forma, el filtro activo debe soportar grandes picos de corriente (trazo rojo) por sus elementos.

Se consideró la solución propuesta por [Peng, 1998], consistente en ubicar un reactor en el lado AC de la carga, de tal forma que 12 pueda estar al rededor de $3pu$, para que la corriente de la carga pueda ser sinusoidal y el FAP opere con picos de corriente menores, haciendo que su funcionamiento sea adecuado.

Figura 10. FAP compensando ASD de 10HP a 460VRMS



Fuente. Simulación Simulink

Dicho lo anterior, en el ciclo ocho de la simulación, el reactor del lado AC es conectado, con lo que la corriente de la fuente se torna sinusoidal; consiguiendo también que los picos de corriente del filtro activo se reduzcan casi en un 50%.

Es claro entonces, que ante cargas de baja impedancia, el FAP tiene un comportamiento poco adecuado. Por una parte, no logra corregir la distorsión de tensión, la corriente no alcanza una forma sinusoidal aceptable y las pérdidas por conmutación en el filtro se ven incrementadas, debido a los mayores valores de corriente que se presentan.

5. CONCLUSIONES

Se determinó analíticamente y mediante simulación, que el filtro activo paralelo es muy sensible a condiciones de baja impedancia de red, las cuales deterioran su funcionamiento.

El comportamiento poco favorable de este filtro ante cargas de baja impedancia o distorsionadoras de tensión, como lo son la mayoría de cargas no lineales modernas, trae consigo diversas consecuencias; entre ellas económicas, ya que si el filtro debe alcanzar

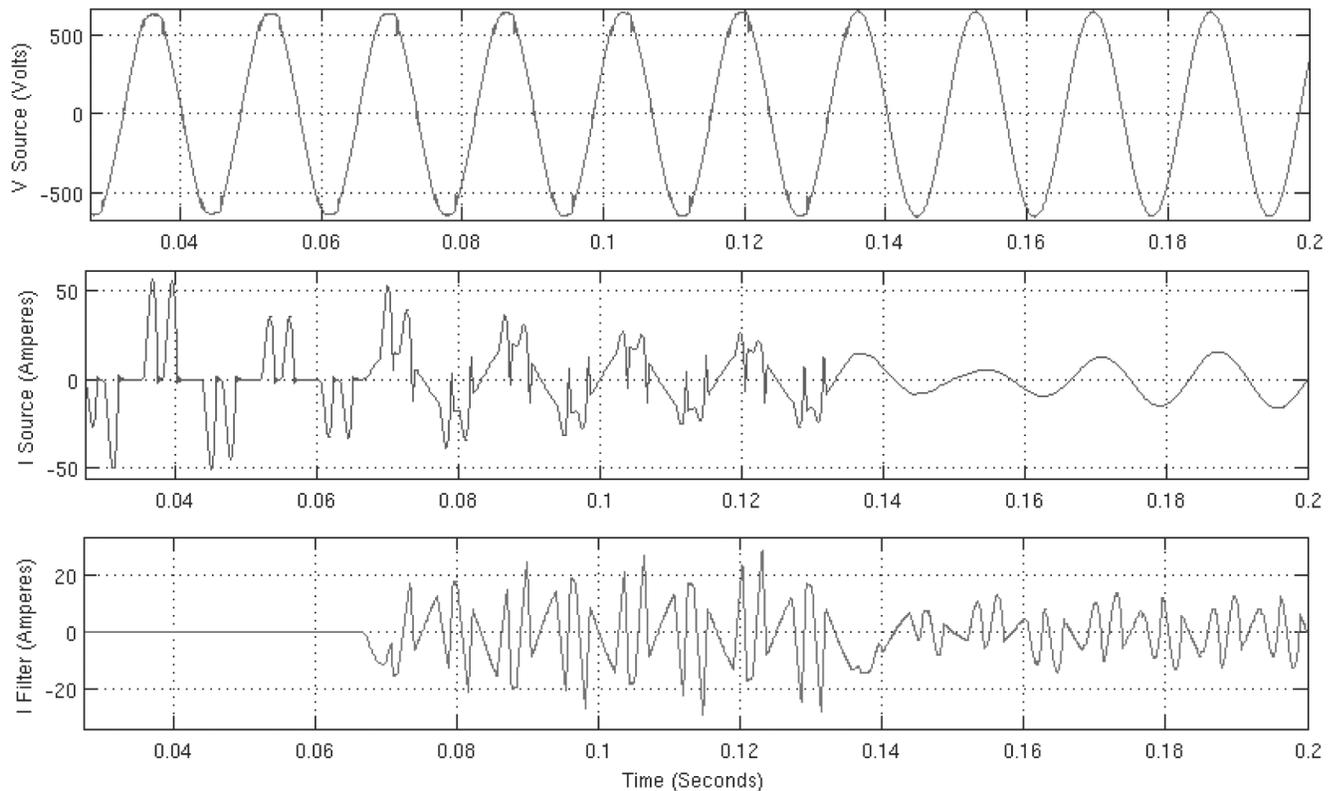
picos de corriente elevados, la potencia en VA del mismo deberá ser incrementada, con lo que los costos del equipo se elevan.

Las pérdidas de potencia por calentamiento del inductor de acople y de los elementos de conmutación, debido a su resistencia interna (R_L ; R_{Corte} y R_{Sat} de los mosfets o IGBT, que se presentan en cada ciclo de conmutación de los mismos); son un factor que impone la necesidad de incrementar costos en equipo adicional de refrigeración y una inversión en mayor potencia de los elementos. Por lo que el ahorro en pérdidas de potencia por circulación de armónicos o el ahorro al evitar penalización por reactivos, puede no presentarse debido al pobre rendimiento del filtro.

Conectar un reactor en serie con la carga es poco viable, ya que es un dispositivo voluminoso, incrementa las pérdidas de potencia por calentamiento y además, mas allá de incrementar la impedancia de la carga para cumplir con la condición en 12, modifica la naturaleza de la misma, de receptor de tensión a receptor de corriente; lo que naturalmente fuerza a la corriente a no cambiar abruptamente.

Es posible hacer uso del compromiso existente entre el valor del inductor de acople con la capacidad de seguimiento de la corriente de referencia; es decir, un valor menor del inductor de acople permitiría controlar mejor la forma de onda de corriente

Figura 11. Comportamiento del FAP frente a carga de baja impedancia



Fuente. Simulación Simulink

que entrega el filtro, realizando un seguimiento más veloz y una corrección más precisa, pero esto exigiría mayor potencia aparente de parte del filtro, lo que a su vez incrementaría las pérdidas de potencia del filtro.

Mejorar el comportamiento de este tipo de filtro frente a condiciones de baja impedancia desde el punto de vista del control, se convierte en una opción llamativa como trabajo futuro.

REFERENCIAS

- Akagi, H., Watanabe, E. H., & Aredes, M. (2007). *Instantaneous Power Theory and Application to Power*. Estados Unidos: Wiley & Sons.
- Arrillaga, J., & Watson, N. R. (2003). *Power System Harmonics*. Wiley.
- Bollen, M., & Gu, I. (2006). *Signal Processing of Power Quality Disturbances*. (Wiley, Ed.) IEEE Press Series on Power Engineering.
- Cáceres, G. A., Lizarazo, J. C., Villalobos, M. A., & Suarez, J. F. (2010). Active power filters: A comparative analysis of current control techniques. *Andescon, 2010 IEEE*, 1-6.
- Cano Plata, E. A., & Tacca, H. E. (2008). *Modelado y simulación en electrónica de potencia con ATP*. Bogota D.C., Colombia.: Centro de Publicaciones Universidad Nacional de Colombia, UNILIBROS.
- Choi, W.-H., Lam, C.-S., Wong, M.-C., & Han, Y.-D. (2013). Analysis of DC-Link Voltage Controls in Three-Phase Four-Wire Hybrid Active Power Filters. *Power Electronics, IEEE Transactions*, 28(5), 2180-2191.
- Gurguiatu, G., Balanuta, C., Munteanu, T., & Gaiseanu, M. (2013). Energy savings generated by installing active power filters in water pumping stations. *Electrical and Electronics Engineering (ISEEE)*, 1-5.
- Karuppanan, P., Mahapatra, K., Jeyaraman, K., & Viji, J. (2011). Fryze power theory with adaptive-hcc based active power line conditioners. *Power and Energy Systems (ICPS), 2011 International Conference on*, 1-6.
- Montero, M. I., Romero Cadaval, E., & Barrero Gonzalez, F. (2007). Comparison of Control Strategies for Shunt Active Power Filters in Three-Phase Four-Wire Systems. *Power Electronics, IEEE Transactions*, 22(1), 229-236.
- Peng, F. Z. (1998). Application issues of active power filters. *Industry Applications Magazine, IEEE*, 4(5), 21-30.
- Pontoriero, D. H., & Mercado, P. E. (2001). Network compensation with active power filters integrated to PV generation. *Power Tech Proceedings, IEEE*

Porto, 2, Conference 2001.

- Ramírez Castaño, S., & Cano Plata, E. A. (2006). *Calidad del Servicio de energía eléctrica*. Manizales, Colombia: Centro de Publicaciones Universidad Nacional de Colombia.
- Santos, T., Pinto, J. G., Neves, P., Goncalves, D., & Alfonso, J. (2009). Comparison of three control theories for single-phase Active Power Filters. *Industrial Electronics, 2009. IECON '09. 35th Annual Conference of IEEE*, 3637-3642.
- Zhang, S., Daheng, L., & Xu, W. (2010). Control Techniques for Active Power Filters. *Electrical and Control Engineering (ICECE), 2010 International Conference on 25-27 june*, 3493-3498.
- Zhao, W., Shangli, Z., & Luo, A. (2011). Novel injection type hybrid active power filter and its energy saving application. *Measuring Technology and Mechatronics Automation (ICMTMA), 2*, 694-700.