



Se propone una novedosa topología

del convertidor del filtro activo de potencia

para incrementar la eficiencia y simplificar
el sistema de control.



Control de un filtro activo de potencia trifásico en derivación por control de corriente

Control of the Shunt Active Power Filter for Current Control

RESUMEN

Este trabajo presenta una nueva topología simplificada de controlador del filtro activo de corriente en derivación, que no requiere medir la potencia activa o reactiva de la carga. Para el control propuesto se utiliza un lazo de seguimiento de fase (PLL) como filtro de tensión y un filtro autosintonizado de corriente. El método de control expuesto en este estudio brinda una adecuada compensación de corriente para tensiones no ideales. Los resultados de la simulación verifican la efectividad de la técnica descrita.

ABSTRACT

This paper presents a new simplified topology of current shunt active filter controller, that not require to measure active or reactive power of the load. For the proposed control Phase Locked Loop (PLL) is used as filter voltage and an autotuning filter of current. The control method presented in this paper provides adequate compensation for non-ideal tension. The simulation results will be presented to verify the effectiveness of the proposed control technique.

INTRODUCCIÓN

Las tensiones en la cabecera de los sistemas de potencia (salida de los generadores), pueden ser consideradas como senoidales perfectas y equilibradas. Las tensiones existentes en la mayoría de los sistemas de transmisión presentan una distorsión inferior al 1% [6]. Sin embargo, la distorsión de estas formas de tensión y corriente se incrementa a medida que nos aproximamos a las cargas finales del sistema.

Los armónicos de corriente tienen su origen en la existencia de cargas no lineales conectadas al sistema de potencia. Estas cargas se han convertido en dispositivos comunes, utilizados en el área industrial, comercial y residencial. Los rectificadores monofásicos (fuente no lineal en el área doméstica), los rectificadores polifásicos (fuente de distorsión armónica en el área industrial), así como convertidores alterna-alterna y los hornos de arco son ejemplos de cargas no lineales.

Los armónicos de corriente causan algunos problemas sobre el sistema de potencia y los equipos conectados al mismo, como sobrecalentamiento en conductores y equipos, resonancia serie y paralelo entre las impedancias del sistema y los elementos capacitivos conectados a este, fallas en banco de condensado-



Palabras Clave

Filtro activo de corriente, transformada Park, lazo de seguimiento de fase (PLL), modulación de ancho de pulso (PWM), Controlador PI, cargas balanceadas y desbalanceadas.

Key words

Active power filter, Park transformation, phase-locked loop (PLL), Pulse width modulation (PWM), PI Controller, unbalanced and balanced load.

res por sobrecalentamiento, excesiva corriente por el neutro, bajo factor de potencia, etc.

Para solucionar estos problemas originados por armónicos, se aplican filtros activos de potencia desde 1970. Mediante ellos, no solo se consigue reducir las perturbaciones armónicas en la red, sino que también es factible actuar sobre las componentes de tensión y corriente de frecuencia fundamental, y alcanzar el equilibrio de fases y la compensación precisa de potencia reactiva. Estos sistemas permiten el control en tiempo real de las tensiones en las barras y del flujo de potencia en las líneas. Para determinar los componentes armónicos y reactivos de la corriente de la carga, varias técnicas han sido introducidas [10].

Dichas estrategias, aplicadas a los filtros activos de potencia [10], juegan un rol importante en la mejora del rendimiento y la estabilidad. En un filtro activo de potencia en derivación, el con-

vertidor estático es el elemento responsable de la inyección de las corrientes de compensación en el sistema. Este convertidor irá acompañado de un sistema de control que garantice que la corriente inyectada en la red elimine o mitigue los armónicos presentes en la misma.

Este trabajo propone una nueva topología del convertidor del filtro activo de potencia para incrementar la eficiencia y simplificar el sistema de control, mediante el uso de un controlador de corriente y un PLL como controlador de tensión.

FILTRO ACTIVO DE POTENCIA

Se consideró un sistema trifásico con cargas variables no lineales. El diagrama de bloques del filtro activo de potencia en derivación se muestra en la figura 1.

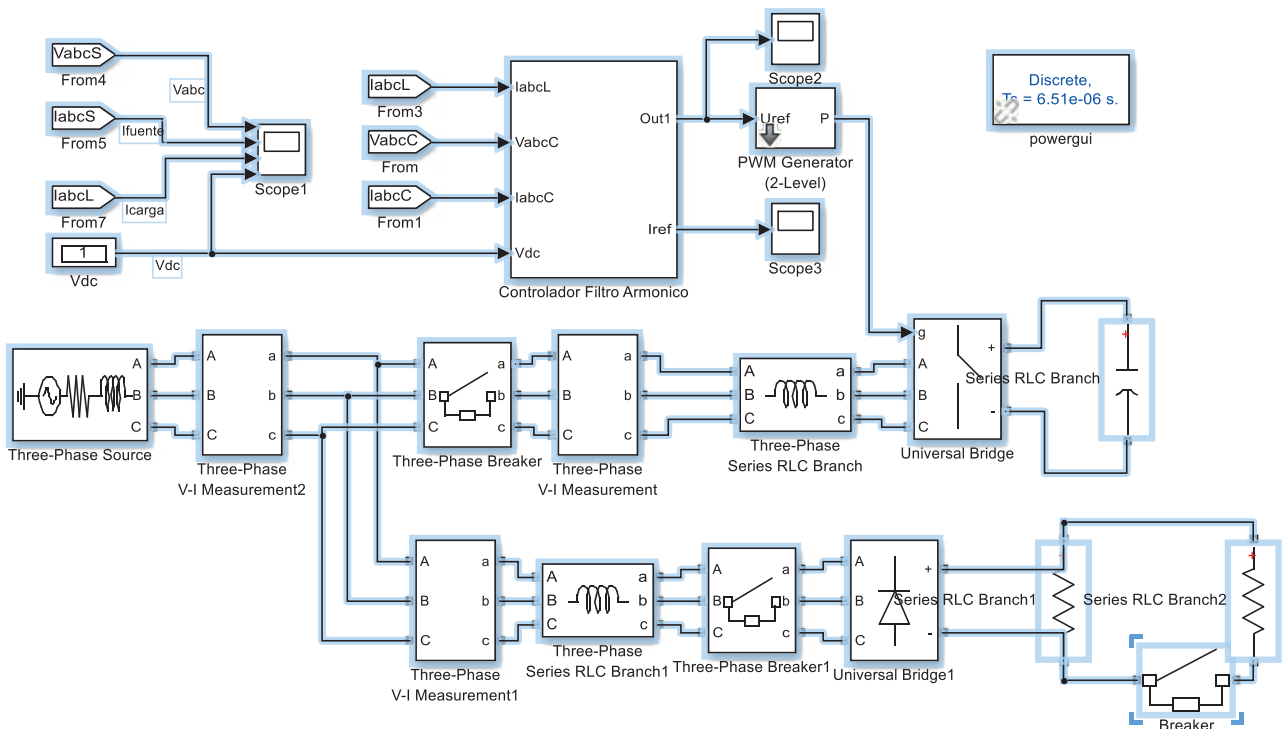


Figura 1: Diagrama de bloques del filtro activo de potencia (FAP) en derivación. Fuente: Elaboración propia.

Como se observa en la Figura 1, el convertidor estático del FAP en derivación enlaza con la red de potencia mediante elementos reactivos (inductancia). Además, el convertidor acumula energía en el lado de continua por medio de un elemento reactivo (capacitor), cuyo valor será superior al de la tensión de la fuente de entrada.

El principal objetivo de un FAP en derivación es compensar los armónicos de corriente y energía reactiva generados por la carga. El filtro activo está constituido por el convertidor de potencia, el enlace de corriente entre el convertidor y el punto de conexión a la red, el elemento almacenador de energía del filtro, los dispositivos de acondicionamiento de las señales de medición (tensión y corriente) y el controlador.

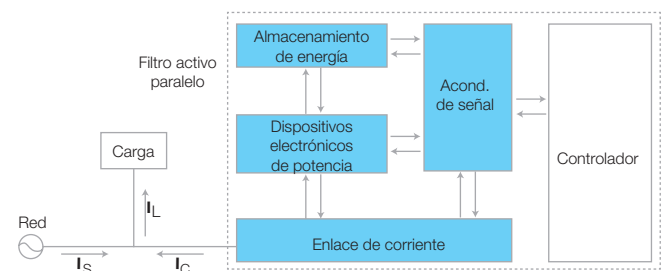


Figura 2: Estructura básica de un filtro activo de potencia paralelo. Fuente: Método de control de filtros activos de potencia paralelo tolerante a perturbaciones de la tensión de red. Tesis de Doctorado, Universidad de Cantabria, Santander, España, 2004.

La corriente extraída de la carga reactiva con presencia de armónicos está dada por [10]:

$$i_L(t) = i_f(t) + i_n(t) + i_q(t) \quad (1)$$

Donde $i_L(t)$ es la corriente de la carga, $i_f(t)$ es la corriente fundamental, $i_n(t)$ es la corriente armónica y $i_q(t)$ es la corriente reactiva. El FAP en derivación opera como una fuente de corriente en paralelo con la carga. Por lo tanto, el convertidor de potencia correspondiente es controlado para generar una compensación de corriente, $i_c(t)$ equivalente y opuesta a la armónica y a la corriente reactiva.

$$i_c(t) = -(i_n(t) + i_q(t)) \quad (2)$$

TOPOLOGÍA DEL CONTROLADOR DEL CONVERTIDOR ESTÁTICO DEL FAP

Para generar la corriente de compensación trifásica, es necesario tener en cuenta la compensación de las corrientes

armónicas y la compensación de la energía reactiva. Para la extracción de las corrientes con las magnitudes y fases precisas, se utilizó un sistema de sincronización de frecuencia y fase, a partir de un PLL, como un filtro sincronizado de tensiones. Es importante señalar que este método no requiere del cálculo de las potencias instantáneas del sistema trifásico.

Los PLL son sistemas realimentados, que captan la frecuencia fundamental de la señal de entrada y generan una salida con amplitud fija y frecuencia igual a la de la entrada [6]. Generalmente se componen de tres bloques: un comparador de fase, un filtro pasa bajas y un oscilador controlado por tensión.

El convertidor, a su vez, está constituido por dispositivos electrónicos de potencia, que mediante su conmutación controlan el flujo de energía (corriente) entre el elemento almacenador y la red. Este dispositivo se comporta como interruptor bidireccional, que permite el flujo de potencia en los dos sentidos (ver Figura 3).

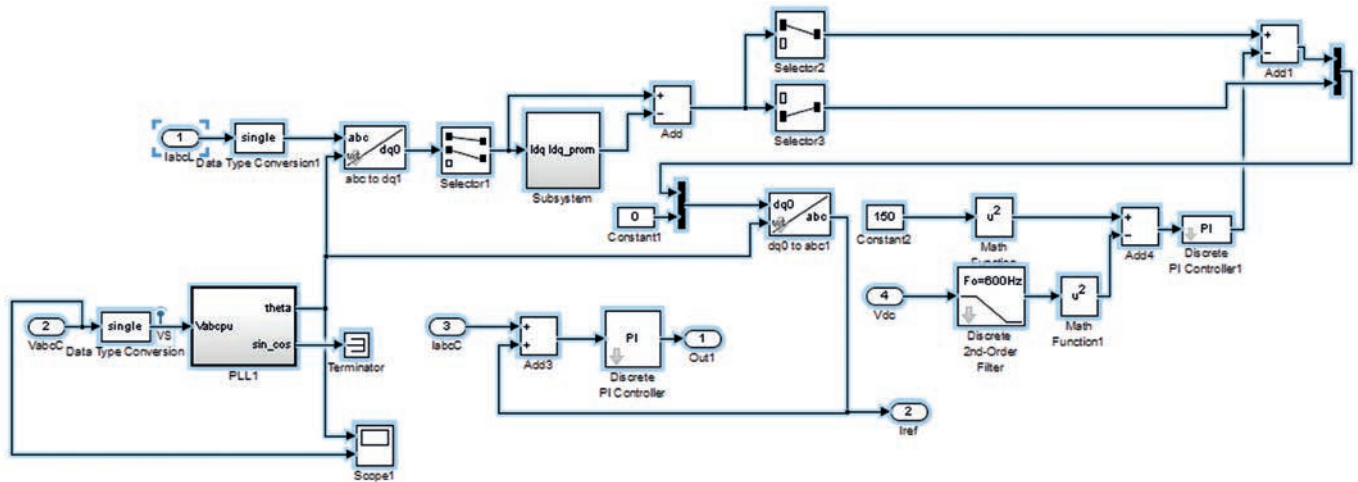


Figura 3: Convertidor estático de potencia del FAP. Fuente: Elaboración Propia.

La Figura 4 muestra el diagrama de control de tensión diferencial del bus de continua. Según el esquema, las funciones de transferencia características del sistema de regulación de la tensión del bus se expresan como [9]:

$$\frac{I_{F0}}{\sum I_{Fi}}(s) = \frac{s}{s + \frac{k(s)}{C}} \quad (3)$$

$$\frac{\Delta V_C}{\sum I_{Fi}}(s) = -\frac{1}{C} \frac{1}{s + \frac{k(s)}{C}} \quad (4)$$

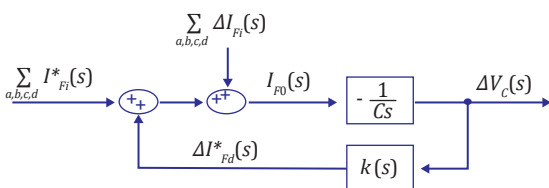


Figura 4: Control de tensión diferencial del bus de continua [9]. Fuente: Aportaciones a los acondicionadores activos de corriente en derivación para redes trifásicas de cuatro hilos. Tesis de Doctorado, Universidad Politécnica de Cataluña, Barcelona, España, 2005.

En el diseño se ha considerado también un filtro pasivo, ubicado en la salida del convertidor, cuyo propósito será “cortocircuitar” las corrientes de alta frecuencia, con el fin de evitar que dichas corrientes sean inyectadas en la red. El convertidor estático se enlazará con la red de potencia mediante elementos reactivos y el acumulador de energía también será otro elemento reactivo. Se deben tener en cuenta los valores y parámetros de tales elementos que condicionarán la respuesta estática y dinámica del sistema.

El controlador de corriente del FAP en derivación tiene por objetivo determinar en tiempo real las corrientes de referencia que el filtro debe inyectar en la red [9]. Las referencias de las corrientes de compensación se obtienen mediante la correspondiente transformación de potencia a corriente. La aplicación de un sistema de referencia sincrónico radica en el uso de un sistema de ejes rotativos (d-q).

En este trabajo se presenta un controlador que establece las referencias de corriente basado en el estado energético de su bus de continua.

En condiciones generales, las corrientes absorbidas por una carga pueden representarse mediante la siguiente ecuación:

$$\vec{i}_{L(\alpha,\beta,\gamma)} = \begin{bmatrix} i_{L\alpha} \\ i_{L\beta} \\ i_{L\gamma} \end{bmatrix} = \sum_{n=1}^{\infty} (\vec{i}_L^{+n} + \vec{i}_L^{-n} + \vec{i}_L^{0n})$$

$$\vec{i}_{L(\alpha,\beta,\gamma)} = \sqrt{\frac{3}{2}} \sum_{n=1}^{\infty} \left(\vec{i}_L^{+n} \begin{bmatrix} \sin(w_n t + \delta^{+n}) \\ -\cos(w_n t + \delta^{+n}) \\ 0 \end{bmatrix} + \vec{i}_L^{-n} \begin{bmatrix} \sin(w_n t + \delta^{-n}) \\ \cos(w_n t + \delta^{-n}) \\ 0 \end{bmatrix} + \sqrt{2} \vec{i}_L^{0n} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \sin(w_n t + \delta^{0n}) \end{bmatrix} \right) \quad (5)$$

Donde los coeficientes I^{+n} , I^{-n} e I^{0n} describen los valores de pico de los armónicos de corriente de secuencia positiva, negativa y homopolar.

En la expresión (6) se muestran las corrientes solicitadas por la carga sobre un sistema de referencia síncrono [7]:

$$\vec{i}_{L(d,q,z)} = \left[T_{dqz_{\theta=\theta_v^{+1}}} \right] \vec{i}_{L(\alpha,\beta,\gamma)} \quad (6)$$

En este nuevo sistema de referencia las corrientes de frecuencia fundamental y secuencia positiva, aparecen como valores constantes en los ejes d^{+1} - q^{+1} , Lo que puede observarse en la ecuación (7):

$$\vec{i}_{L(d,q,z)} = \begin{bmatrix} i_{Ld^{+1}} \\ i_{Lq^{+1}} \\ i_{Lz^{+1}} \end{bmatrix} = \left[T_{dqz_{\theta=\theta_v^{+1}}} \right] \begin{bmatrix} i_{L\alpha} \\ i_{L\beta} \\ i_{L\gamma} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} i_{Ld^{+1}}^{+1} \\ i_{Lq^{+1}}^{+1} \\ 0 \end{bmatrix} + \sum_{n=2}^{\infty} \begin{bmatrix} i_{Ld^{+1}}^{+n} \\ i_{Lq^{+1}}^{+n} \\ 0 \end{bmatrix} + \sum_{n=1}^{\infty} \begin{bmatrix} i_{Ld^{+1}}^{-n} \\ i_{Lq^{+1}}^{-n} \\ 0 \end{bmatrix} + \sum_{n=1}^{\infty} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ i_{Lz^{+1}}^{0n} \end{bmatrix} \quad (7)$$

Esta igualdad es utilizada, considerando las corrientes en el eje d y q , para lograr controlar la tensión V_{dc} y la corriente de salida.

La potencia activa será suministrada por la fuente del sistema de potencia, ya que el FAP en derivación no es capaz de entregar

o almacenar energía de manera permanente. Además, se debe tener en cuenta que las pérdidas de potencia interna del filtro representan un determinado consumo de potencia activa. Por lo tanto, el valor medio de la potencia activa instantánea a suministrar por la fuente es:

$$\vec{p}_{S3\phi} = \vec{p}_{L3\phi} + \vec{p}_{int} \quad (8)$$

Donde $p_{S3\phi}$ es la potencia activa entregada por la fuente, $p_{L3\phi}$ es la potencia activa instantánea consumida por la carga, p_{int} es la potencia activa instantánea consumida por el filtro. La potencia instantánea de la fuente está relacionada con la corriente directa de frecuencia fundamental ($I_{sd^{+1}}^{*}$) que debe solicitar el filtro activo de potencia en derivación para mantener constante el valor medio de la energía almacenada en el bus de continua.

Cuando se conoce la potencia activa instantánea en el lado de la fuente y de carga, la diferencia permite determinar la potencia activa instantánea desarrollada por el FAP en derivación:

$$p_{F3\phi} = p_{L3\phi} - p_{S3\phi} = \vec{p}_{L3\phi} - \vec{p}_{S3\phi} - \vec{p}_{int} \quad (9)$$

RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN

En la Figura 5 se muestran los resultados de la corriente de la carga al considerar una carga no lineal monofásica (rectificador), la corriente de salida del controlador, y la corriente de la fuente corregida por el filtro activo en derivación.

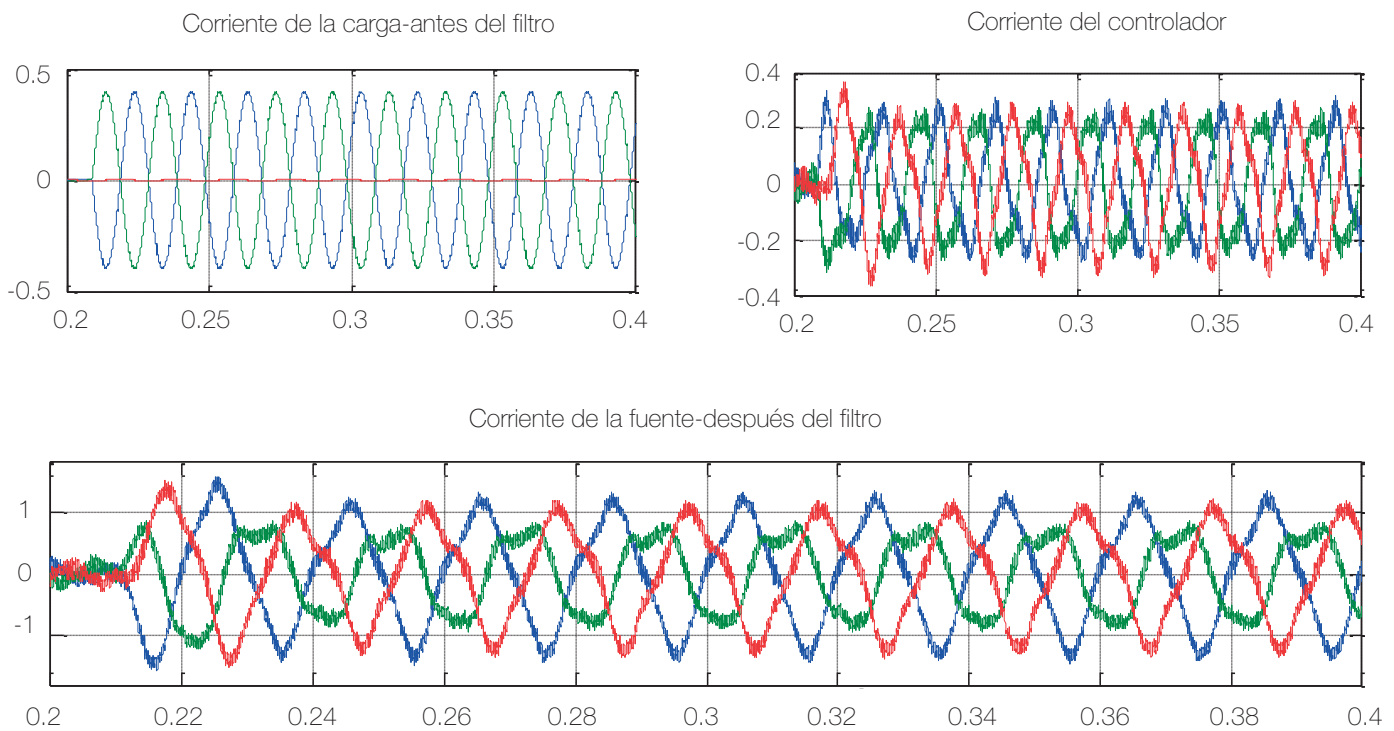


Figura 5: Seguimiento de la forma de onda de: a) corriente de la carga, b) corriente del controlador, c) corriente de la fuente. Fuente: elaboración propia

Como se deduce de la figura, las corrientes fueron compensadas parcialmente para una carga monofásica, carga desbalanceada.

La Figura 6 presenta los resultados del seguimiento de las corrientes para una carga trifásica (rectificador trifásico).

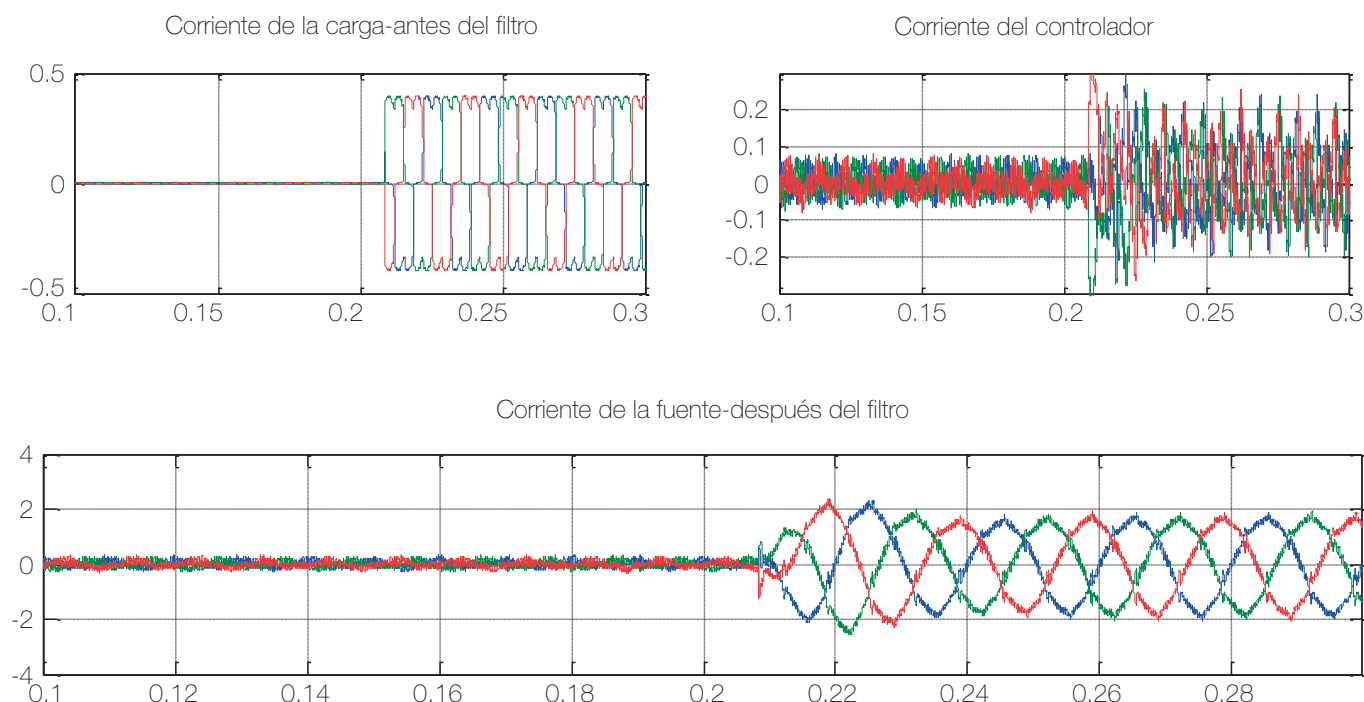


Figura 6: Seguimiento de forma de onda de: a) corriente de la carga, b) corriente del controlador, c) corriente de la fuente
Fuente: elaboración propia

Como se puede observar, la respuesta del filtro es bastante rápida al igual que con el uso considerando una topología más simplificada.

CONCLUSIONES

En este modelo sólo se utiliza el sintonizador PLL como filtro de tensión para obtener las tensiones de referencia rotatoria, por lo que no es necesario un filtro adicional.

En los resultados de la simulación se demuestra la adecuada sincronización de la corriente además de la rápida respuesta.

La simulación en Matlab/Simulink facilita a la implementación de la programación de un DSP de punto flotante y su posterior sintonización en línea con las herramientas de dicho software.

REFERENCIAS

[1] Abaali, H., Lamchich, M., & Raou, M. (2008). Shunt Power Active Filter Control under Non Ideal Voltages Conditions. *International Journal of Electrical, Computer, Energetic, Electronic and Communication Engineering*, 2 (10), 2427-2432.

[2] Akagi, H., Hirokazu, E., & Aredes, M. (2007). *Instantaneous Power Theory and Applications to Power Conditioning*. EE.UU: Wiley-IEEE Press.

[3] Apte, N., Bapat, V., & Jog, A. (2007). A Shunt Active Filter for Reactive Power Compensation and Harmonic Mitigation. *7th International Conference on Power Electronics*, Daegu, Corea del Sur.

[4] Azevedo, H., Ferreira, J., Martins, A., & Carvalho, A. (2003). *Direct Current Control of an Active Power Filter for Harmonic Elimination, Power Factor Correction and Load Unbalancing Compensation*. Porto: Faculty of Engineering of The University of Porto. Recuperado de <https://repositorio-aberto.up.pt/bitstream/10216/202/2/24507.pdf>

[5] Singh, B., Al-Haddad, K., & Chandra, A. (1999). A Review of Active Filters for Power Quality Improvement, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 46 (5), 960-971.

[6] López, O. (2010). *Filtro activo paralelo para compensación de factor de potencia y distorsión armónica en aplicaciones industriales* (Tesis de maestría). Universidad Nacional de Colombia, Bogotá. Recuperado de <https://core.ac.uk/download/pdf/11052869.pdf?repositoryId=334>

[7] Pigazo, A. (2004). *Método de control de filtros activos de potencia paralelo tolerante a perturbaciones de la tensión de red* (Tesis doctoral). Universidad de Cantabria, Santander. Recuperado de <http://www.tdx.cat/bitstream/handle/10803/10632/0de8.APLprevio.pdf?sequence=1>

[8] Rashid, M. (Ed.). (2001). *Power Electronics Handbook*. Canadá: Academic Press.


- [9]** Rodríguez, P. (2005). *Aportaciones a los acondicionadores activos de corriente en derivación para redes trifásicas de cuatro hilos* (Tesis doctoral). Universidad Politécnica de Cataluña, Barcelona.
- [10]** Samet, B., Soydan, R., Ozgur, O., & Malabika, B. (2013). Control of the shunt Active Power Filter under non-ideal grid voltage and unbalanced load conditions. *Power Engineering Conference (UPEC)*, (pp.1-5). Dublin, Irlanda.
- [11]** Núñez Zúñiga, T., Soto Lock, A., & Moreno Martínez, R. (2014). Filtro Activo de Potencia Bajo Diferentes Tipos de Carga. *Electrónica - UNMSM*, 15, 17-27. Recuperado de <http://revistasinvestigacion.unmsm.edu.pe/index.php/electron/article/view/3987>

ACERCA DE LOS AUTORES

Baldomero Néstor Enríquez Ychocan

Recibió el grado de Ingeniero Electricista en la Escuela de Ingeniería Eléctrica de la Universidad Nacional de San Agustín (UNSA), Perú, en el 2012.


Se desempeña actualmente como jefe de Oficina Técnica - Área Eléctrica e Instrumentación, en el proyecto de Expansión de la Mina Cerro Verde del Grupo Graña y Montero en Arequipa.

 nbenriquez@gmail.com

María Teresa Mendoza Llerena

Obtuvo el grado de Ingeniero Electricista en la Escuela de Ingeniería Eléctrica en la Universidad Nacional de San Agustín (UNSA), Perú, en el 2003; el grado de Msc. en el departamento de máquinas eléctricas, accionamientos y energía por la Universidad Federal de Rio Grande do Sul (UFRGS), Brasil, en el 2006; y el grado de doctor en el Departamento de Sistemas de Control y Energía en la Escuela de Ingeniería Eléctrica y Computación (FEEC) por la Universidad Estadual de Campinas (Unicamp), Brasil, en el 2011.

En la actualidad ejerce como docente en el área de medidas eléctricas, instrumentación y máquinas eléctricas en Tecsup - Arequipa.

 mmendoza@tecsup.edu.pe