



Comité Nacional Venezolano

## II CONGRESO VENEZOLANO DE REDES Y ENERGÍA ELÉCTRICA

Junio 2009

B4-87

### Esquema de Control para Filtros Activos Basado en Potencia Activa y Reactiva Instantánea

A. Bueno\*

J. Restrepo\*

J. Aller\*

\* Grupo de Sistemas Industriales de Potencia. Universidad Simón Bolívar.

#### RESUMEN

En los sistemas industriales, la utilización de variadores de velocidad para el control de máquinas eléctricas puede introducir componentes armónicas que causan niveles de distorsión harmónica total de corriente (*THD*) del orden de 80%, medido en la barra de alimentación. En las instalaciones comerciales, las luminarias modernas de bajo consumo y las fuentes conmutables de los equipos electrónicos introducen a la red altos niveles de armónicas que ocasionan una circulación de corriente excesiva en el conductor de neutro, incremento de pérdidas en los transformadores y desbalances en el sistema trifásico debido al esquema de conexión monofásico de estas cargas. La solución planteada generalmente a esta problemática consiste en la utilización de *UPS* para la alimentación de cargas sensibles, aumento de la capacidad de carga del conductor de neutro y el reemplazo del transformador por uno de mayor potencia, diseñado para operar con armónicas.

En este trabajo se presenta un esquema de control para filtros activos trifásicos basado en el control de potencia activa y reactiva constante. Este esquema permite reducir el impacto armónico de cargas no lineales conectadas en una barra del sistema, corregir el factor de potencia y balancear las corrientes en el sistema de alimentación ante cargas de alto consumo monofásico. El esquema se fundamenta en la modulación vectorial de la tensión del filtro activo, para ajustar el flujo de potencia aparente instantánea. El esquema propuesto, elimina los retardos inherentes a los esquemas de control de filtros activos, fundamentados en la modulación de corriente para obtener la compensación armónica. Este sistema se valida experimentalmente para analizar las características dinámicas del esquema de control en la compensación de estos tipos de carga.

#### PALABRAS CLAVE

Filtros Activos, Potencia Activa y Reactiva Instantánea, Compensación Armónica, Desbalance de Corriente, Modulación Vectorial.

## INTRODUCCIÓN

Los sistemas de potencia débiles y radiales son susceptibles a presentar problemas debido a la circulación de armónicas o por la presencia de desequilibrios. Estos se traducen generalmente en operaciones inadecuadas de los generadores, transformadores, protecciones y sobre calentamiento de los conductores, en especial el hilo de neutro. Por este motivo se plantea la conveniencia de utilizar filtros y compensación de carga que reduzca o elimine estos inconvenientes a fin de ampliar las posibilidades operativas del sistema y mejorar su calidad de servicio eléctrico [1,2,3], con la finalidad de permitir la alimentación de cargas sensibles sin requerir fuentes ininterrumpidas de potencia.

Es necesario un análisis exhaustivo de los esquemas de filtrado y compensación de desequilibrios para proponer soluciones prácticas, económicas y técnicamente factibles a los problemas de armónicas y desequilibrios en la carga asociados con la operación normal de estos sistemas con carga monofásica y altamente contaminantes. Los convertidores electrónicos de potencia disponibles, pueden solventar aisladamente estos problemas en el sistema eléctrico. La aparición del análisis y las técnicas vectoriales de control de estos dispositivos, basados en interruptores de estado sólido tales como los IGBT, abren un campo de investigación que ofrece nuevas posibilidades a la solución de estos problemas [2,4].

El esquema planteado, se centra en el desarrollo de técnicas de control vectorial en puentes rectificadores activos utilizados como filtro activos conectados en el sistema trifásico, capaces de balancear y filtrar los efectos de la carga y su contenido armónico para incrementar las prestaciones y calidad del servicio eléctrico en estas condiciones especiales de operación [1,2,3]. Las propuestas de control desarrolladas en esta investigación son validadas experimentalmente mediante un sistema modular de electrónica de potencia, que permite reproducir las condiciones de operación del sistema y los convertidores para el filtrado y balanceo de la carga [5].

## SISTEMA DE COMPENSACIÓN

En la figura 1, se presenta el esquema de control de la compensación propuesta utilizando un filtro activo paralelo, en conexión directa a la barra de alimentación del sistema de potencia. La topología de filtro activo que se utilizara para el sistema de compensación propuesto es la de rectificador activo trifásico o también denominada por algunos autores como rectificador trifásico *PWM* [6].

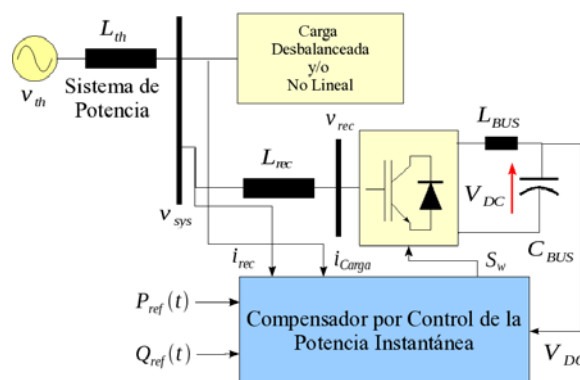


Fig. 1. Sistema de compensación propuesto.

En la figura 2(a), se presenta la topología de convertidor electrónico, compuesta por seis componentes IGBT,s con su respectivo diodo de descarga libre en antiparalelo. El esquema de control propuesto corrige los problemas de calidad de servicio derivados del desbalance en las corrientes en el sistema trifásico, control del factor de potencia y contenido armónico. En la figura 2(b) se muestran los siete posibles estados del puente.

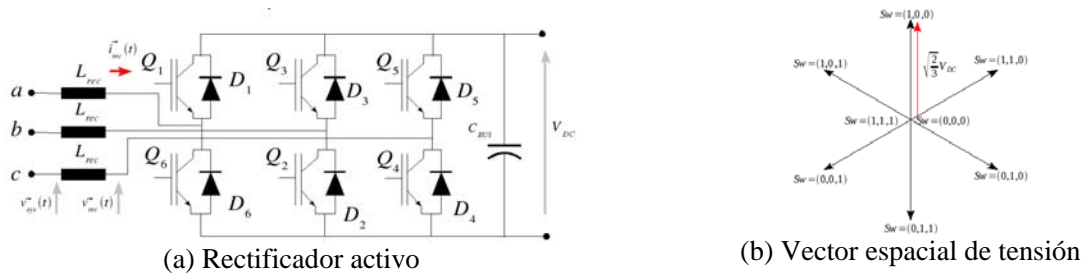


Fig. 2. Rectificador activo y vectores espaciales de tensión  $\vec{v}_{rec}$  en función del vector de estados  $\mathbf{Sw}$  de interruptores

## VENTAJAS DEL CONTROL DE POTENCIA INSTANTÁNEA

El vector espacial para un sistema trifásico de tensiones, sinusoidales de igual magnitud, desfasadas en  $2\pi/3$  radianes entre ellas y de secuencia positiva, es:

$$\vec{v}_s = \sqrt{\frac{2}{3}} \left( v_a + v_b e^{j\frac{2\pi}{3}} + v_c e^{j\frac{4\pi}{3}} \right) = \sqrt{3} V_e e^{j(\omega t + \theta)} \quad (1)$$

donde:

$$v_a = \sqrt{2} V_e \cos(\omega t + \theta) ; v_b = \sqrt{2} V_e \cos\left(\omega t + \theta - \frac{2\pi}{3}\right) ; v_c = \sqrt{2} V_e \cos\left(\omega t + \theta - \frac{4\pi}{3}\right)$$

Utilizando el resultado de la ecuación (1), para un sistema de tensiones trifásicas expresadas en función de su expansión en Series de Fourier, el vector espacial en función del contenido armónico es:

$$\vec{v}_s = \sqrt{\frac{2}{3}} \left( v_a + v_b e^{j\frac{2\pi}{3}} + v_c e^{j\frac{4\pi}{3}} \right) = \sqrt{3} \sum_{n=1}^{\infty} V_n e^{j(n\omega t + \theta_n)} \quad (2)$$

donde:

$$v_{a,b,c} = V_0 + \sum_{n=1}^{\infty} \sqrt{2} V_n \cos\left(n\omega t + \theta_n - \frac{2\pi k}{3}\right) ; k = \{0,1,2\}$$

Realizando un análisis similar para la corriente.

$$\vec{i}_s = \sqrt{3} \sum_{m=1}^{\infty} I_m e^{j(m\omega t + \beta_m)} \quad (3)$$

Calculando la potencia aparente instantánea a partir del vector espacial de tensión y corriente [7] de las expresiones (2) y (3), se obtiene:

$$\vec{s} = \vec{v}_s \cdot \vec{i}_s^* = 3 \left[ \left[ \sum_{n=1}^{\infty} V_n e^{j(n\omega t + \theta_n)} \right] \cdot \left[ \sum_{m=1}^{\infty} I_m e^{j(m\omega t + \beta_m)} \right]^* \right] = 3 \left[ \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{m=1}^{\infty} V_n \cdot I_m e^{j(n-m)\omega t} e^{j(\theta_n - \beta_m)} \right] \quad (4)$$

Analizando la expresión (4) de potencia aparente instantánea, se puede determinar que la condición de potencia activa y reactiva constante se alcanza cuando  $n = m$ , debido a que se anula la dependencia con el tiempo. Esto indica que para mantener potencia constante la tensión y la corriente deben poseer los mismos armónicos en su respectiva distribución, igual secuencia de giro y deben ser equilibrados. En la mayoría de los sistemas de potencia, la tensión tiene una distorsión armónica inferior al 5% y un reducido desequilibrio. El control por potencia activa y reactiva instantánea constante fuerza a que la corriente mantenga el mismo comportamiento que la tensión, cumpliendo lo estipulado en las regulaciones internacionales para la conversión de corriente alterna a corriente continua [8].

## ESQUEMA DE CONTROL POR POTENCIA INSTANTÁNEA

Calculando la potencia aparente instantánea, a partir de la definición de los vectores espaciales de tensión y corriente, se obtiene [3,7]:

$$\vec{s} = \vec{v}_s \cdot \vec{i}_s^* = (v_{s\alpha} + jv_{s\beta})(i_{s\alpha} + ji_{s\beta})^* = p + jq \quad (5)$$

La ecuación del sistema eléctrico de la figura 1, se puede escribir como:

$$\vec{v}_s = \vec{v}_r + R\vec{i}_s + L\frac{d\vec{i}_s}{dt} \quad (6)$$

Discretizando la ecuación (6) y remplazando la derivada por su aproximación rectangular, se calcula la corriente en el siguiente instante de tiempo “k” como:

$$\hat{i}_s(k+1) = \vec{i}_s(k) + \Delta\hat{i}_s(k) \quad (7)$$

donde:

$$\Delta\hat{i}_s(k) = \vec{i}_s(k) + \frac{T_s}{L} \left[ \hat{v}_s(k) - \hat{v}_r(k) - \hat{R}\vec{i}_s(k) \right] \quad (8)$$

De la ecuación (5) se puede estimar la potencia activa y reactiva instantánea, para la siguiente muestra del periodo de tiempo:

$$\vec{s}(k+1) = \vec{s}(k) + \Delta\vec{s}(k) = (\hat{v}_s(k) + \Delta\hat{v}_s(k)) \cdot (\vec{i}_s(k) + \Delta\hat{i}_s(k))^* = \vec{v}_s(k) \cdot \vec{i}_s(k)^* + \Delta\hat{v}_s(k) \cdot \vec{i}_s(k)^* + \hat{v}_s(k+1) \cdot \Delta\hat{i}_s(k)^* \quad (9)$$

Remplazando la expresión (8) en (9), y utilizando la definición de potencia aparente instantánea  $\Delta\vec{s}(k) = \Delta p(k) + j\Delta q(k)$ , se obtiene:

$$\Delta\vec{s}(k) = \Delta\hat{v}_s(k) \cdot \vec{i}_s(k)^* + \hat{v}_s(k+1) \cdot \frac{T_s}{L} \left[ \hat{v}_s(k) - \hat{v}_r(k) - \hat{R}\vec{i}_s(k) \right]^* \quad (10)$$

En un sistema de potencia con tensiones sinusoidales puras, es posible obtener el vector espacial  $\hat{v}_s(k+1)$  rotando el vector de tensión del instante anterior ( $\hat{v}_s(k)$ ) en el ángulo  $\Delta\theta = \omega T_s$ .

$$\hat{v}_s(k+1) = \vec{v}_s(k) \cdot e^{j\omega T_s} \Rightarrow \Delta\hat{v}_s(k) = \vec{v}_s(k) (e^{j\omega T_s} - 1) \quad (11)$$

La potencia aparente instantánea  $\vec{s}(k)$  es una función de la tensión de alimentación del sistema y de su corriente. La corriente puede ser controlada variando la consigna de disparo del rectificador *PWM*,  $\hat{v}_r(k)$ , con la finalidad de obtener los valores de los comandos de  $p_{ref}$  y  $q_{ref}$ . Definiendo  $\Delta\vec{s}_0(k)$  como el término independiente de la tensión del rectificador de la ecuación (10).

$$\Delta\vec{s}_0(k) = \Delta\hat{v}_s(k) \cdot \vec{i}_s(k)^* + \hat{v}_s(k+1) \cdot \frac{T_s}{L} \left[ \vec{v}_s(k) - \hat{R}\vec{i}_s(k) \right]^* = \vec{v}_s(k) \cdot \vec{i}_s(k)^* \left[ \left( 1 - \frac{T_s \hat{R}}{L} \right) e^{j\omega T_s} - 1 \right] + \frac{T_s}{L} |\vec{v}_s(k)|^2 \cdot e^{j\omega T_s} \quad (12)$$

Cualquier cambio en la referencia de potencia activa y reactiva instantánea, se puede expresar como función de la tensión en el rectificador ( $\hat{v}_r(k)$ ). La variación de la potencia aparente instantánea  $\Delta\vec{s}(k) = \Delta p(k) + j\Delta q(k)$ , necesario para realizar el cambio entre el valor actual y el solicitado ( $p_{ref} + jq_{ref}$ ), viene dado por las siguientes expresiones:

$$\Delta\vec{s}(k) = \Delta\vec{s}_0(k) - \frac{T_s}{L} \left[ \hat{v}_s(k+1) \cdot \hat{v}_r(k)^* \right] \quad (13)$$

$$\vec{e}_s(k) = (p_{ref}(k+1) - p(k)) + j(q_{ref}(k+1) - q(k)) = \Delta p(k) + j\Delta q(k) = \epsilon_p(k) + j\epsilon_q(k) \quad (14)$$

Estableciendo una función de costo mediante los errores cuadráticos entre las potencias activas y reactivas instantáneas, se obtiene:

$$J(k) = \eta_p \left( \epsilon_p(k) - \Re e |\Delta \bar{s}(k)| \right)^2 + \eta_q \left( \epsilon_q(k) - \Im m |\Delta \bar{s}(k)| \right)^2 \quad (15)$$

Donde los valores de  $\eta_p$  y  $\eta_q$  son pesos que pondera la importancia de la potencia activa y reactiva dentro de la función de costo  $J$ . La función de costo  $J(k)$  por su forma cuadrática presenta un mínimo global en cero. Al forzar  $J(k)=0$  en la expresión (15), se obtiene el vector espacial de tensión del rectificador  $\widehat{\vec{v}}_r(k)$ , requerido para mantener las referencias de potencia activa y reactiva instantánea:

$$\widehat{\vec{v}}_r(k) = \widehat{v}_{r\alpha}(k) + j \widehat{v}_{r\beta}(k) = \frac{\hat{L}}{T_s} \left[ \frac{\Delta \bar{s}_0(k) - \Delta \bar{\epsilon}_s(k)}{\vec{v}_s(k) \cdot e^{j\omega T_s}} \right]^* \quad (16)$$

El vector espacial de tensión (16), se sintetiza en el convertidor utilizando modulación vectorial (*SVM*) [5]. Al igual que con otros algoritmos de control directo de potencia *DPC*, los parámetros de inductancia y resistencia ( $L, R$ ) son necesarios para calcular el valor estimado de la tensión del sistema. El algoritmo propuesto tiene muchas ventajas sobre los métodos existentes, proporciona una corrección instantánea de la potencia activa y reactiva que fluye en el convertidor, reduce el rizado en la potencia instantánea y en las corrientes resultantes, presenta una baja distorsión armónica y requiere menores tiempos computacionales. Debido a la rápida respuesta dinámica de esta técnica, la calidad del lazo de control de la tensión en la barra de corriente continua, no está limitado por la dinámica del controlador.

## MODULACIÓN VECTORIAL

La técnica de control por potencia activa y reactiva instantánea, requiere la sintetización del vector espacial del rectificador de la expresión (16) a partir de los estados de los ocho estados de conectividad del puente rectificador activo. Cualquier vector espacial ubicado en una posición específica con magnitud igual o menor a los presentados en la figura 2(b), se obtiene como una combinación lineal de los estados adyacentes y del estado cero. En la figura 3, se muestran algunos ejemplos de la modulación espacial vectorial. Un vector en el sector “ $i$ ” puede ser sintetizado por modulación espacial vectorial como:

$$\vec{v}_r = \sqrt{\frac{2}{3}} \left( x_i e^{j\frac{\pi}{3}(i-1)} + y_i e^{j\frac{\pi}{3}i} + z_i \cdot 0 \right) \quad (17)$$

Donde  $x_i, y_i$  y  $z_i$  son los ciclos de trabajo de los vectores adyacentes a cada zona ( $x_i + y_i + z_i = 1$ ). Utilizando  $z_i = 0$  se obtiene la máxima magnitud del vector espacial.

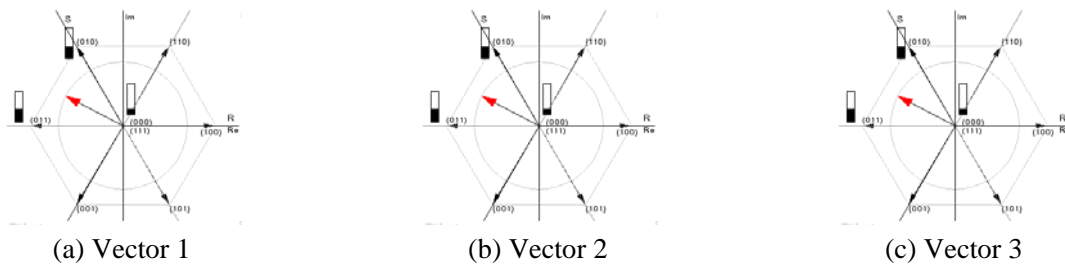


Fig. 3 Ejemplos de Modulación Vectorial.

## VALIDACIÓN EXPERIMENTAL

Para la implantación del algoritmo propuesto se utilizó la plataforma modular del grupo de Sistemas Industriales de Electrónica de Potencia (*SIEP*) de la Universidad Simón Bolívar [5]. Este sistema es un monolito compuesto por seis IGBT de 50A a 1200V con sus respectivos diodos en antiparalelo, dos

condensadores en serie de  $2200\mu F$  de  $400V$  en la barra de continua y tres inductancias de choque de  $7.0mH$ . La plataforma se controla mediante un *DSP* de punto flotante *ADSP-2160-40MHz* y La señales de *PWM* para la modulación vectorial se realizan mediante un co-procesador de movimiento *ADMC-21* que opera a  $10kHz$ . En la figura 4, se muestra el módulo de potencia utilizado.

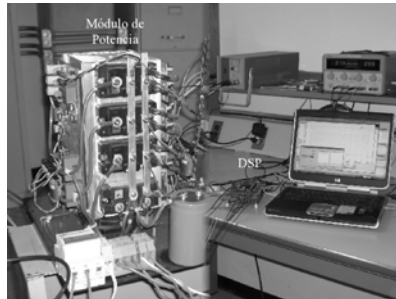


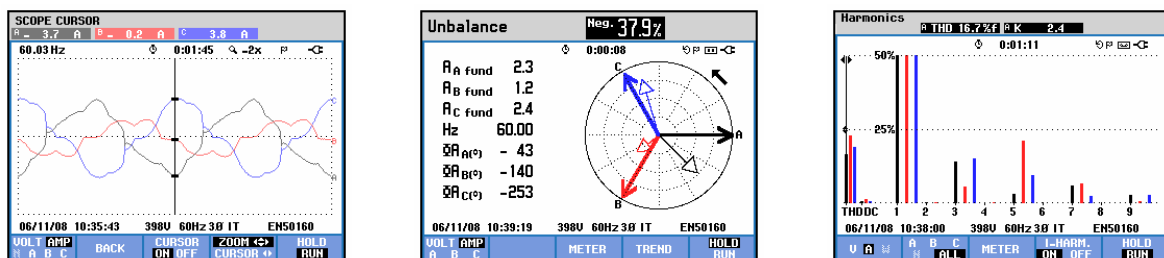
Fig. 4. Plataforma Experimental.

En la figura 5, se presentan los oscilogramas de corriente en las tres fases, para una carga monofásica conectada línea a línea, con y sin la presencia del compensador. Esta condición es la más severa de desbalance en un sistema trifásico ya que por una fase no circula corriente, mientras que en las otras dos la corriente es igual y de signo contrario. Se puede observar como el compensador disminuye las corrientes en la fases “b” y “c” e incrementa la corriente de la fases “a” para lograr la compensación. De igual forma, disminuye el porcentaje de desbalance de  $97.3\%$  a  $11.3\%$  al mismo tiempo que regula el factor de potencia a  $99\%$ . El proceso de compensación incrementa el *THD* de la corriente al  $2\%$ .



Fig. 5. Corriente en la barra de alimentación para una carga monofásica con y sin el sistema de compensación.

En la figura 6, se presentan los oscilogramas, diagramas vectoriales y contenido armónico de corriente en las tres fases en la barra de alimentación para carga desbalanceada no lineal. En la figura 6(a) se presentan las corrientes sin la presencia del sistema de compensación y en la 6(b) con el compensador. Se puede observar como el compensador incrementa la corriente en la fase “b” para lograr la compensación y reduce el contenido armónico de la corriente. El factor de potencia en la barra con el compensador se regula a la unidad y el desbalance en corrientes pasa de  $37.9\%$  al  $1.3\%$ . El factor de distorsión armónica total (*THD*) de corriente disminuye del  $16.7\%$  al  $4.1\%$ .



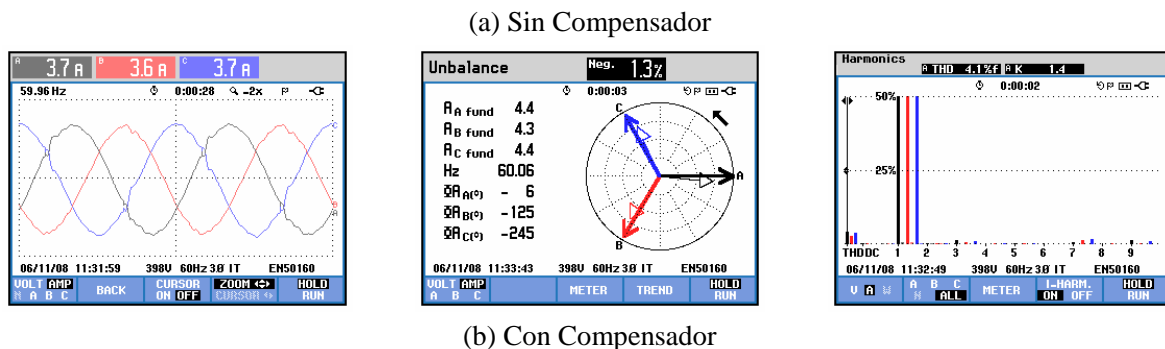


Fig. 6. Oscilograma, diagrama vectorial y contenido armónico de la corriente en la barra de alimentación para una carga no lineal desbalanceada.

## CONCLUSIONES

El cálculo directo del vector espacial de la tensión del rectificador es la mejor alternativa para el control directo de potencia, debido a: su rápida respuesta, bajo rizado, frecuencia de conmutación constante, baja inyección de armónicos a la red y robustez ante la variación de parámetros del estimador. El controlador tiene una respuesta casi instantánea ante cambios de la consigna de potencia, limitado únicamente por el período del ciclo de control necesario para la adquisición y cálculo de las variables.

El sistema de compensación propuesto mediante el control de potencia instantánea a partir del cálculo directo del vector espacial, reduce el desbalance de corriente a valores permisibles por la normativa internacional ( $<10\%$ ) y disminuye su efecto sobre otros equipos del sistema eléctrico. En las condiciones más exigentes de desbalance reduce este porcentaje de 97% a 12%, para el caso extremo de alimentación de carga monofásica.

El sistema de compensación, también reduce el contenido armónico de la corriente a valores permisibles por la normativa internacional, teniendo un impacto importante sobre la tercera y quinta armónica que son las de mayor valor introducido por las fuentes conmutables, sistemas de iluminación modernos y ciclo-convertidores. El algoritmo de compensación es capaz de controlar el factor de potencia consumido en la barra de alimentación bajo todas las condiciones analizadas.

De la validación experimental se observa que existe un compromiso entre la corrección del desbalance y la reducción del contenido armónico de las corrientes dado por la capacidad de almacenamiento de energía del filtro activo en su inductancia de choque y en el capacitor de la barra de corriente continua.

## BIBLIOGRAFÍA

- [1] H. Li, F. Zhuo, L. Wu, W. Lei, J. Liu, and Z. Wang, "A novel current detection algorithm for shunt active power filters in harmonic elimination, reactive power compensation and three-phase balancing" (IEEE 35th Annual Power Electronics Specialists Conference, PESC 04. 2004, vol. 2, pp. 1017-31023).
- [2] R. S. Herrera, P. Salmerón, and H. Kim, "Instantaneous reactive power theory applied to active power filter compensation: Different approaches, assessment, and experimental results," (vol. 55, pp. 184–196, Jan. 2008).
- [3] V. Soares, P. Verdelho, and G. D. Marques, "An instantaneous active and reactive current component method for active filters," (vol. 15, pp. 660–669, July 2000).
- [4] P. Antoniewicz, M. P. Kazmierkowski, S. Aurtenechea, and M. A. Rodriguez, "Comparative study of two predictive direct power control algorithms for three-phase AC/DC converters," (Proceedings of the 2007 European Conference on Power Electronics and Applications, EPE 2007, pp. P1–P10, Sept. 2007).

- [5] J. Restrepo, J. Viola, J. M. Aller, and A. Bueno, "A Simple Switch Selection State For Svm Direct Power Control," (Proceedings of the 2006 IEEE International Symposium on Industrial Electronics, ISIE 2006, pp. 1112–1116, July 2006).
- [6] B. k. Bose,"Modern Power Electronics and AC Drives". (Prentice-Hall, 2002).
- [7] J. M. Aller, A. Bueno, and T. Pagá, "Power system analysis using space vector transformation," (IEEE Transaction on Power System, vol. 17, no. 4, pp. 957–965, 2002).
- [8] IEC, IEC 61000-3-2 "Limits for Harmonic Currents Emissions". (International Electrotechnical Commission Standard, 2004).