

# Control basado en pasividad de un filtro activo *shunt* para compensación de armónicos

Por Federico M. Serra, Cristian H. de Angelo, Daniel G. Forchetti  
Grupo de Electrónica Aplicada (GEA)  
Universidad Nacional de Río Cuarto, Córdoba

### Resumen

Se presenta el diseño de un controlador no lineal, basado en pasividad, para un filtro activo *shunt* utilizado para compensar las componentes armónicas consumidas por una carga no lineal. El objetivo de control consiste en inyectar la corriente de compensación necesaria para que la corriente consumida desde el sistema de potencia sea sinusoidal pura y balanceada, independientemente de si la tensión de red presenta desbalance y/o armónicos. Las referencias de la corriente de compensación son obtenidas haciendo uso de la Teoría de la Potencia Reactiva Instantánea. El sistema es representado mediante su modelo Hamiltoniano controlado por puerto, y el controlador es diseñado mediante asignación de interconexión y amortiguamiento utilizando un método constructivo basado en técnicas

de Lyapunov. El desempeño de la estrategia de control propuesta es validado mediante simulaciones realizadas sobre un modelo realista del convertidor.

### Palabras claves

Pasividad, filtros activos, teoría pq, filtros *shunt*, convertidor de frente activo.

### 1. Introducción

La utilización de cargas no lineales se ha incrementado notablemente debido al avance en el desarrollo de los dispositivos electrónicos de potencia. Este tipo de carga consume corriente con alto contenido armónico, la cual debe ser suministrada por la fuente de alimentación y transportada por

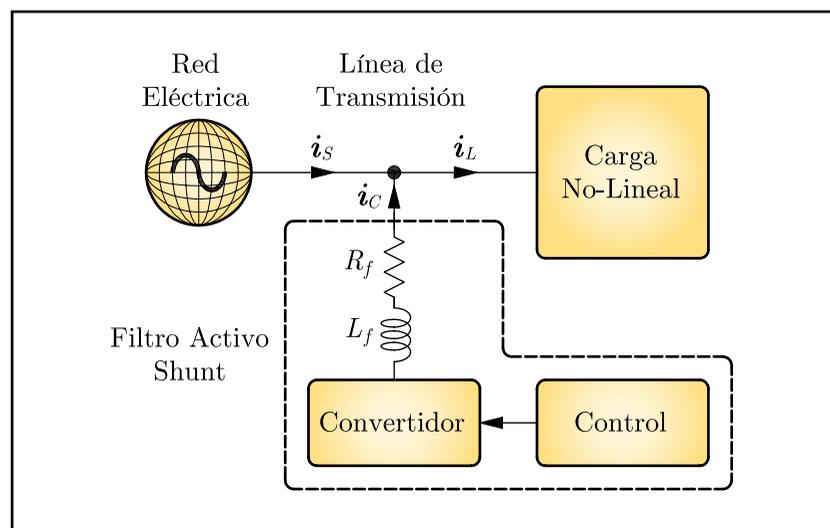


Figura1. Esquema de compensación con un SAF

la línea de transmisión, produciéndose un aumento de las pérdidas debido al incremento en el valor eficaz de dicha corriente.

El consumo de corriente con alto contenido armónico, además de generar pérdidas en la línea, disminuye la calidad de la energía suministrada y establece penalizaciones por parte de los proveedores de energía eléctrica. Por ello la eliminación de estos armónicos implica una reducción de costos en la operación del sistema.

Una forma de compensar las corrientes armónicas consumidas por una carga no lineal es mediante la utilización de un filtro activo *shunt* (*Shunt Active Filter, SAF*) (Akagi *et al.*, 2007). Estos filtros están compuestos por un convertidor, un filtro pasivo y un controlador, tal como se muestra en la figura 1.

El convertidor tiene por finalidad inyectar la corriente de compensación en el sistema de potencia, mientras que el controlador es el encargado de generar las señales de disparo para las llaves semiconductoras de potencia que constituyen el convertidor.

El convertidor utilizado para implementar el SAF es un convertidor fuente de tensión (*Voltage Source Converter, VSC*) con un filtro RL que permite la inyección de la

corriente de compensación en el sistema de potencia. La utilización de un VSC en la implementación del SAF se debe a que éste permite flujo de potencia bidireccional y presenta baja distorsión armónica en la salida (Yazdani y Iravani, 2010).

Debido a los inconvenientes mencionados en lo que al consumo de corrientes con alto contenido armónico se refiere y teniendo en cuenta que el SAF puede modelarse como un sistema no lineal, el diseño del controlador requiere generalmente la aplicación de técnicas de control no lineal.

Entre estas técnicas, aquellas basadas en pasividad se han empleado satisfactoriamente en aplicaciones donde intervienen convertidores de potencia (Ortega *et al.*, 1998). Uno de estos métodos es el de asignación de interconexión y amortiguamiento (*Interconnection and Damping Assignment, IDA*) (Ortega *et al.*, 2002), el cual ha sido utilizado en el diseño de controladores para VSC usados como rectificadores (Gaviria *et al.*, 2005; Pengfei *et al.*, 2008; Yuliang *et al.*, 2008; Méndez *et al.*, 2006) e inversores (Serra *et al.*, 2011, 2012; Zong-xiang y Lu-sheng, 2010; Kun *et al.*, 2011). Este método consiste en modificar la función de energía del sistema para lograr una diná-

mica de seguimiento del error que asegure su convergencia a cero.

En este trabajo se diseña una estrategia de control para el SAF utilizando IDA con el objetivo de lograr que la corriente entregada por la red sea sinusoidal pura y balanceada. En el diseño de esta estrategia se usa un método constructivo para calcular la asignación de interconexión y amortiguamiento, el cual está basado en técnicas de Lyapunov; de esta manera se garantiza la convergencia asintótica del error a cero. La estrategia de control IDA tiene la característica de ser un método sistemático de diseño en el cual queda definida claramente la estructura del sistema, esto permite seleccionar la interconexión adecuada para cancelar los acoplamientos indeseados entre las variables de estado, y además, asignar el amortiguamiento necesario para lograr la velocidad de convergencia deseada.

Por otro lado, las referencias de corriente para el controlador IDA se obtuvieron haciendo uso de la Teoría de Potencia Reactiva Instantánea, o Teoría pq (Akagi *et al.*, 1983), la cual permite cancelar las componentes indeseables de la corriente consumida por la carga estableciendo las potencias real e imaginaria definidas por la estrategia de control (Serra *et al.*, 2009;

## Nota técnica

Akagi *et al.*, 2007). Además, con el objetivo de compensar pérdidas adicionales en el sistema se considera una componente adicional a la corriente de referencia que a su vez permite realizar el control de la tensión de la barra de corriente continua (CC). Finalmente, el desempeño de la estrategia de control propuesta es validado mediante resultados de simulación realizados sobre un modelo realista del convertidor.

El trabajo está organizado de la siguiente manera: en la sección 2 se describe el sistema propuesto, en la sección 3 se presenta el modelo del sistema en coordenadas de Park y el modelo hamiltoniano controlado por puerto (*Port-Controlled Hamiltonian, PCH*), en la sección 4 se diseña la estrategia de control propuesta para el SAF y en la sección 5 se muestran resultados de simulación.

### 2. Descripción del sistema

El sistema considerado en este trabajo consta de una fuente de potencia (red eléctrica) que alimenta una carga no lineal a través de una línea de transmisión. En paralelo con la carga se conecta un SAF utilizado para cancelar las corrientes armónicas consumidas por dicha carga, como se muestra en la figura 1.

Con el objetivo de modelar una red fuerte, se considera como fuente de potencia una barra de potencia infinita sin impedancia. Este modelo considera que la corriente consumida por la carga no modifica la tensión de red.

La carga no lineal considerada está formada por una impedancia inductiva ( $L_{ac}$ ) conectada en serie con un puente rectificador controlado (con ángulo de conducción de  $30^\circ$ ) que alimenta una carga resistiva inductiva ( $R_c, L_c$ ), más una resistencia trifásica ( $R_{ac}$ ) conectada en paralelo con dicha carga no lineal; tal como se muestra en la figura 2.

Este tipo de carga consume potencia con un alto contenido armónico en las corrientes de

línea ( $i_{La}$ ,  $i_{Lb}$  e  $i_{Lc}$ ). Se utiliza este tipo de carga con el objetivo de analizar el comportamiento del SAF en condiciones altamente desfavorables.

El convertidor de potencia utilizado para implementar el SAF es un VSC construido con transistores ( $S_1, \dots, S_6$ ) de tipo IGBT (*Isolated Gate Bipolar Transistors*), como el que se muestra en la figura 3.

Para conectar el convertidor en paralelo con el sistema de potencia es necesario colocar un filtro inductivo entre ambos, para lograr que el VSC funcione como una fuente de corriente controlada permitiendo inyectar la corriente de compensación en el sistema de potencia.

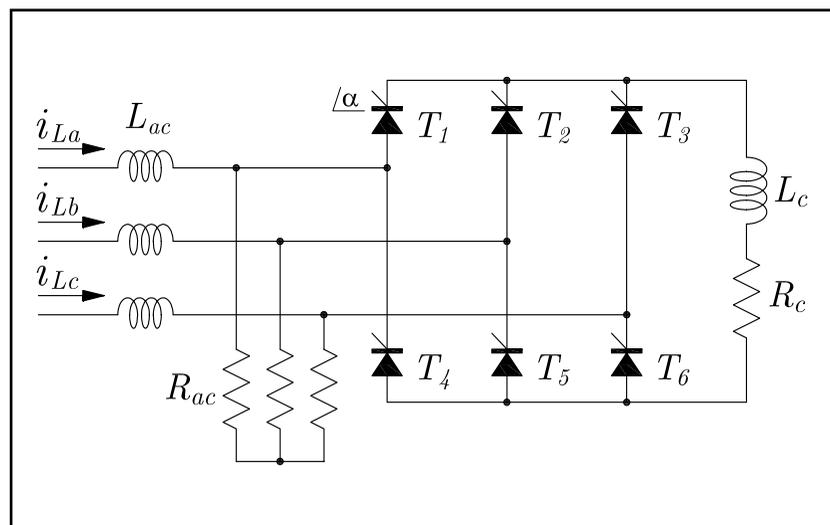


Figura 2. Carga no lineal

### 3. Modelo del SAF

A continuación se presenta el modelo del SAF en coordenadas de Park utilizando la transformación invariante en potencia, y luego se escribe este modelo en la forma PCH.

#### 3.1 Modelo en coordenadas de Park

El modelo del SAF en coordenadas de Park (dq) se puede escribir como (Blasko y Kaura, 1997)

$$\begin{aligned} L_f \dot{i}_{Cd} &= -R_f i_{Cd} - \omega_{dq} L_f i_{Cq} + m_d v_{dc} - e_d, \\ L_f \dot{i}_{Cq} &= -R_f i_{Cq} + \omega_{dq} L_f i_{Cd} + m_q v_{dc} - e_q, \\ C \dot{v}_{dc} &= -m_d i_{Cd} - m_q i_{Cq}. \end{aligned} \quad (1)$$

donde  $\omega_{dq}$  es la velocidad del referencial, que en este trabajo se considera igual a la frecuencia de red;  $i_{Cd}$  e  $i_{Cq}$  son las corrientes en el marco de referencia seleccionado, obtenidas mediante la transformación de  $i_{Ca}$ ,  $i_{Cb}$  e  $i_{Cc}$ ;  $e_d$  y  $e_q$  son las tensiones de red obtenidas mediante la transformación de  $e_a$ ,  $e_b$  y  $e_c$ ;  $v_{dc}$  es la tensión de la barra de CC;  $m_d$  y  $m_q$  son los índices de modulación y, finalmente,  $L_f$  y  $R_f$  son la inductancia y la resistencia del filtro respectivamente.

El sistema formado se puede escribir en forma matricial de la siguiente manera:

$$\begin{bmatrix} L_f \dot{i}_{Cd} \\ L_f \dot{i}_{Cq} \\ C \dot{v}_{dc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -R_f & -\omega_{dq} L_f & m_d \\ \omega_{dq} L_f & -R_f & m_q \\ -m_d & -m_q & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{Cd} \\ i_{Cq} \\ v_{dc} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -e_d \\ -e_q \\ 0 \end{bmatrix}. \quad (2)$$

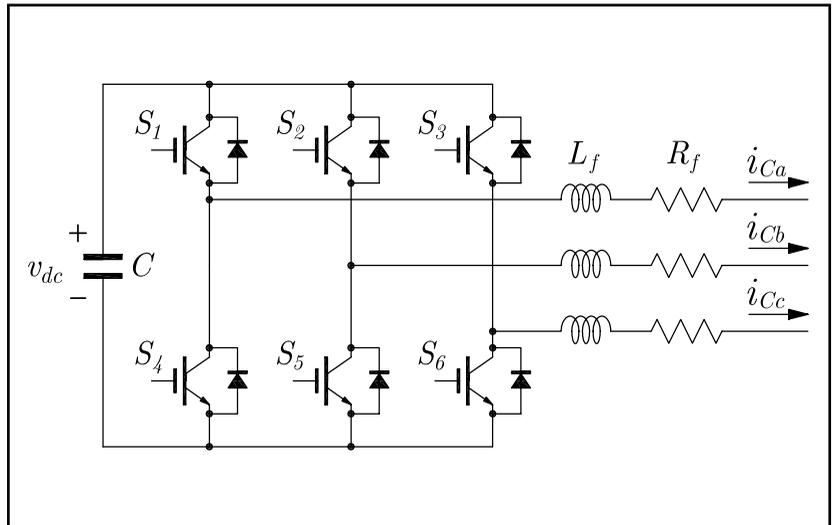


Figura 3. Convertidor de potencia

#### 3.2 Modelo PCH

Para poder diseñar un control mediante IDA se debe representar al sistema mediante su modelo PCH (Ortega *et al.*, 2002), esto es, debe expresarse como

$$\dot{x} = [J(x, u) - R(x)] \frac{\partial H(x)}{\partial x} + \zeta, \quad (3)$$

donde  $x = [L_f i_{Cd} \ L_f i_{Cq} \ C v_{dc}]^T$  es el vector de estado,  $u = [m_d \ m_q]^T$  son las entradas al sistema,  $J(x, u)$  es la matriz de interconexión, que expresa el acoplamiento entre las variables del sistema,

$$J(u) = -J^T(u) = \begin{bmatrix} 0 & -\omega_{dq} L_f & m_d \\ \omega_{dq} L_f & 0 & m_q \\ -m_d & -m_q & 0 \end{bmatrix},$$

$R(x)$  es la matriz de amortiguamiento, que contiene aquellos elementos que disipan energía,

$$R = \begin{bmatrix} R_f & 0 & 0 \\ 0 & R_f & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix},$$

y  $\zeta = [-e_d \ -e_q \ 0]^T$  son perturbaciones externas (tensiones medidas de la red).

La función  $H(x)$  representa la energía del sistema, y está dada por la suma de la energía almacenada en los inductores del filtro de salida y el capacitor de la barra de CC, esto es

$$H(x) = \frac{L_f i_{Cd}^2}{2} + \frac{L_f i_{Cq}^2}{2} + \frac{C v_{dc}^2}{2}, \quad (4)$$

de donde se puede calcular

$$\frac{\partial H(x)}{\partial x} = [i_{Cd} \ i_{Cq} \ v_{dc}]^T, \quad (5)$$

### 4. Diseño del controlador

La estrategia de control tiene

## Nota técnica

por objetivo compensar las corrientes armónicas consumidas por una carga no lineal con el fin de lograr que la corriente entregada por la red sea sinusoidal pura y balanceada, independientemente de la forma de onda de la tensión de red. Para lograr este objetivo es necesario que el SAF inyecte la corriente de compensación adecuada en el sistema de potencia. Las referencias de estas corrientes de compensación se obtienen mediante el uso de la Teoría pq.

El diseño del controlador consiste en lograr que cada variable del sistema (3) siga la referencia determinada por  $x^* = [L_f i_{cd}^* \quad L_f i_{cq}^* \quad C v_{dc}^*]^T$ , llevando el error de convergencia ( $\varepsilon = x - x^*$ ) a cero.

Para ello se asigna la siguiente dinámica para el error:

$$\dot{\varepsilon} = [J_d(\mathbf{u}) - R_d] P^{-1} \varepsilon, \quad (6)$$

donde  $J_d(\mathbf{u}) = J(\mathbf{u}) + J_a(\mathbf{u})$  y  $R_d = R + R_a$  son las matrices de interconexión y amortiguamiento deseadas, y

$$P = \begin{bmatrix} L_f & 0 & 0 \\ 0 & L_f & 0 \\ 0 & 0 & C \end{bmatrix}.$$

Así, el diseño consiste en elegir adecuadamente las matrices  $J_a(\mathbf{u})$  y  $R_a$  de tal manera de asegurar la convergencia del error a cero. Es-

pecíficamente, los coeficientes de  $R_a$  se eligen haciendo uso del criterio de estabilidad de Lyapunov, a partir de la siguiente función candidada de Lyapunov,

$$V = \frac{1}{2} (\varepsilon^T P^{-1} \varepsilon), \quad (7)$$

cuya derivada en el tiempo es,

$$\dot{V} = -\varepsilon^T P^{-1} R_d P^{-1} \varepsilon < 0, \quad (8)$$

y así  $R_d$  debe ser una matriz definida positiva para garantizar la convergencia a cero del error.

$J_a(\mathbf{u})$  se elige para eliminar los acoplamientos entre las variables de estado del sistema y así obtener ecuaciones simples para el error que permitan determinar los parámetros del controlador para la velocidad de convergencia deseada para cada error. Así se elige

$$J_a(\mathbf{u}) = \begin{bmatrix} 0 & \omega_{dq} L_f & -m_d \\ -\omega_{dq} L_f & 0 & -m_q \\ m_d & m_q & 0 \end{bmatrix}, \quad (9)$$

de tal manera que las ecuaciones para la dinámica del error quedan

$$\begin{aligned} \dot{\varepsilon}_{cd} &= -\frac{(R_f + R_1)}{L_f} \varepsilon_{cd}, \\ \dot{\varepsilon}_{cq} &= -\frac{(R_f + R_2)}{L_f} \varepsilon_{cq}, \\ \dot{\varepsilon}_{dc} &= -\frac{R_3}{C} \varepsilon_{dc}, \end{aligned} \quad (10)$$

de donde se puede calcular  $R_1$ ,  $R_2$  y  $R_3$  para lograr la velocidad de convergencia deseada.

Finalmente, las leyes de control para  $m_d$  y  $m_q$  pueden obtenerse de (9) y (10) como

$$m_d = \frac{1}{v_{dc}} [L_f i_{cd}^* + R_f i_{cd}^* + \omega_{dq} L_f i_{cq} - R_1 (i_{cd} - i_{cd}^*) + e_d], \quad (11)$$

$$m_q = \frac{1}{v_{dc}} [L_f i_{cq}^* + R_f i_{cq}^* - \omega_{dq} L_f i_{cd} - R_2 (i_{cq} - i_{cq}^*) + e_q]. \quad (12)$$

Los términos derivativos presentes en las ecuaciones (11) y (12) son calculados utilizando observadores de alta ganancia (Dabroom y Khalil, 1997).

Las corrientes de referencia,  $i_{cd}^*$  e  $i_{cq}^*$  se eligen con el fin de lograr que la corriente entregada por la red sea sinusoidal pura y balanceada. Estas corrientes están formadas por las corrientes de compensación,  $i_{cdComp}^*$  e  $i_{cqComp}^*$ , necesarias para cumplir con el objetivo de control; más una corriente,  $i_{cdPer}^*$  encargada de compensar las pérdidas adicionales del sistema, esto es

$$\begin{aligned} i_{cd}^* &= i_{cdComp}^* + i_{cdPer}^*, \\ i_{cq}^* &= i_{cqComp}^* \end{aligned} \quad (13)$$

Las corrientes de compensación,  $i_{cdComp}^*$  e  $i_{cqComp}^*$ , se obtienen haciendo uso de la Teoría pq (Serra et al., 2009). Para que la carga

consuma de la fuente únicamente corriente sinusoidal balanceada, la corriente eficaz entregada por la red,  $I_s$ , debe estar formada únicamente por la componente fundamental de secuencia positiva,  $I_s^{+1}$ , de manera tal que

$$I_s^{-1} = I_s^{+n} = 0, \quad (n \geq 2), \quad (14)$$

donde "n" indica el número de armónico al que está asociada la componente de corriente correspondiente.

Haciendo uso de la definición de potencia real e imaginaria se puede escribir que (Akagi *et al.*, 1983, 2007),

$$\tilde{q}_s^{+1} = \tilde{p}_s^{+1} = 0 \Rightarrow I_s^{-1} = I_s^{+n} = 0, \quad (15)$$

donde "p" y "q" representan las potencias real e imaginaria oscilantes. El supraíndice "+1" indica que estas potencias se calculan utilizando únicamente la componente fundamental de secuencia positiva de la tensión ( $e^{+1}$ ) y el subíndice S indica que las potencias se calculan utilizando la corriente entregada por la red ( $I_s$ ).

Además, para que el sistema no consuma energía reactiva de la fuente, es necesario que la tensión  $e^{+1}$  y la corriente  $I_s$  estén en fase, es decir

$$\tilde{q}_s^{+1} = 0, \quad (16)$$

donde q es la potencia imaginaria constante.

Utilizando las ecuaciones (15) y (16), es posible calcular las potencias consumidas por la carga que deben ser compensadas por el SAF ( $p_{\text{Comp}}^*$  y  $q_{\text{Comp}}^*$ ) como

$$\begin{aligned} p_{\text{Comp}}^* &= \tilde{p}_L^{+1}, \\ q_{\text{Comp}}^* &= \tilde{q}_L^{+1} + \tilde{q}_L^{+1} = q_L^{+1}, \end{aligned} \quad (17)$$

donde  $p_{\text{Comp}}^*$  y  $q_{\text{Comp}}^*$  son las referencias de potencia y el subíndice L indica que las potencias  $\tilde{p}_L^{+1}$ ,  $\tilde{q}_L^{+1}$  y  $q_L^{+1}$  se calculan utilizando la componente fundamental de secuencia positiva de la tensión ( $e^{+1}$ ) y la corriente consumida por la carga ( $I_L$ ).

Las corrientes  $i_{\text{CdComp}}^*$  e  $i_{\text{CqComp}}^*$  se pueden obtener a partir de las potencias de compensación como

$$\begin{bmatrix} i_{\text{CdComp}}^* \\ i_{\text{CqComp}}^* \end{bmatrix} = \frac{1}{(e_d^{+1})^2 + (e_q^{+1})^2} \begin{bmatrix} e_d^{+1} & e_q^{+1} \\ e_q^{+1} & -e_d^{+1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p_{\text{Comp}}^* \\ q_{\text{Comp}}^* \end{bmatrix}. \quad (18)$$

La componente de la corriente que se encarga de compensar las pérdidas adicionales (autodescarga del capacitor de la barra de CC, conmutación, conducción, etc.) puede obtenerse haciendo el balance de potencia en el convertidor y considerando la dinámica de la tensión de la barra de CC mediante las ecuaciones (1) y (10). De esta manera, es posible obtener

una corriente de pérdida aproximada como la siguiente:

$$i_{\text{CdPerd}}^* = \frac{1}{2} \left[ -\frac{e_d}{R_f} \pm \sqrt{\left(\frac{e_d}{R_f}\right)^2 - 4\Delta} \right], \quad (19)$$

con

$$\Delta = \left[ i_{\text{Cq}}^{*2} - \frac{v_{\text{dc}} R_3}{R_f} (v_{\text{dc}} - v_{\text{dc}}^*) \right]. \quad (20)$$

Esta corriente se obtiene suponiendo que los lazos de control de corriente son mucho más rápidos que el lazo de control de tensión ( $i_{\text{Cd}} = i_{\text{Cd}}^*$  e  $i_{\text{Cq}} = i_{\text{Cq}}^*$ ) y además  $e_q = 0$ . Incluso aunque  $i_{\text{CdPerd}}^*$  se obtiene usando un modelo ideal del sistema (sin incluir pérdidas) una correcta elección de  $R_3$  permite realizar adecuadamente el control de la tensión de la barra de CC.

La referencia de tensión de la barra de CC  $v_{\text{dc}}^*$  se elige en un valor constante de manera tal que la tensión  $v_{\text{dc}}$  se mantenga en valores que permitan al convertidor inyectar la corriente de compensación requerida.

En la figura 4 se muestra el esquema de control propuesto para el SAF. Este esquema de control emplea un detector de secuencia positiva (*Positive Sequence Detector*, PSD) que permite la orientación del referencial para hacer  $e_q = 0$  y la obtención de  $e^{+1}$ . El PSD utilizado

# Nota técnica

en este trabajo es un DSOGI-FLL el cual presenta mayor robustez ante perturbaciones en la tensión de red (armónicos, desbalance, variaciones de frecuencia) comparado con otros métodos (Serra *et al.*, 2010).

## 5. Resultados de simulación

Con el objetivo de evaluar el desempeño del SAF utilizando la estrategia de control propuesta, se diseñaron ensayos que fueron simulados usando un modelo realista del sistema que incluye las pérdidas en el convertidor y los efectos de la modulación. Las simulaciones fueron realizadas utilizando el paquete SimPower-System de Matlab™.

Los parámetros del controlador usados en las simulaciones son mostrados en la tabla 1 y las especificaciones del SAF, la carga no lineal y la red, en la tabla 2.

Se realizaron dos ensayos para mostrar el desempeño dinámico del SAF en el caso de tensión de red sinusoidal pura y balanceada y para el caso en que esta tensión presente desbalance y armónicos.

Parámetro	Valor
$R_1$	12,49
$R_2$	12,49
$R_3$	0,05

Tabla 1. Parámetros del controlador

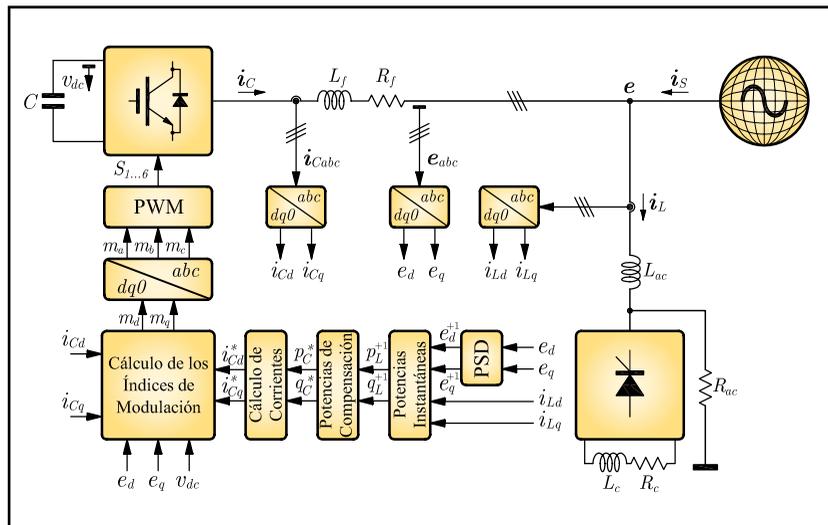


Figura 4. Estrategia de control propuesta

Parámetro	Valor
$L_f$	2,5 mH
$R_f$	1 mΩ
$C$	1000 μF
$R_{on(IGBT)}$	1 mΩ
$f_s$	10 kHz
$L_{ac}$	4 mH
$R_{ac}$	2 kΩ
$L_c$	5 H
$R_c$	25 Ω
$e_a, e_b, e_c$	311 V
$f$	50 Hz

Tabla 2. Parámetros del SAF, la carga no lineal y la red

### 5.1 Tensión balanceada

Para este ensayo se utiliza una tensión de línea trifásica, sinusoidal y balanceada.

En la figura 5 se muestra la corriente de la fase a en distintos

puntos del sistema para el ensayo de conexión del filtro. Se arranca el sistema sin compensación y en el tiempo  $t = 0,05$  s, se conecta el SAF para compensar las corrientes armónicas consumidas por la carga.

En la figura 5 (a) y (b) se muestra la forma de onda de la corriente de compensación ( $i_c$ ) y la corriente consumida de la red ( $i_{sa}$ ), respectivamente, para el ensayo descrito.

Para verificar que la estrategia propuesta cumple con el objetivo de que la corriente consumida desde la red sea sinusoidal y balanceada, se realizó una descomposición espectral de Fourier en redes de secuencia de las mismas. En la figura 6 (a) se muestra el espectro de corriente para  $t < 0,05$  s (sin compensar) y en la figura 6 (b) se muestra el

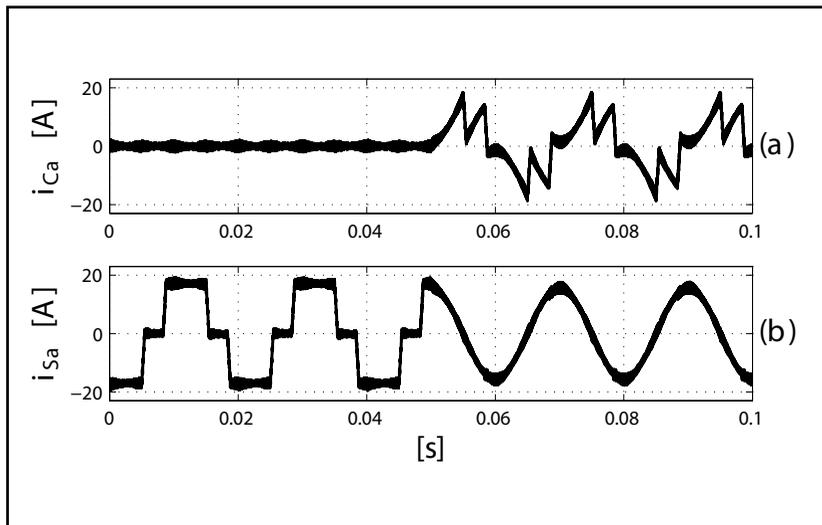


Figura 5. Corrientes en la fase a del sistema (tensión balanceada)

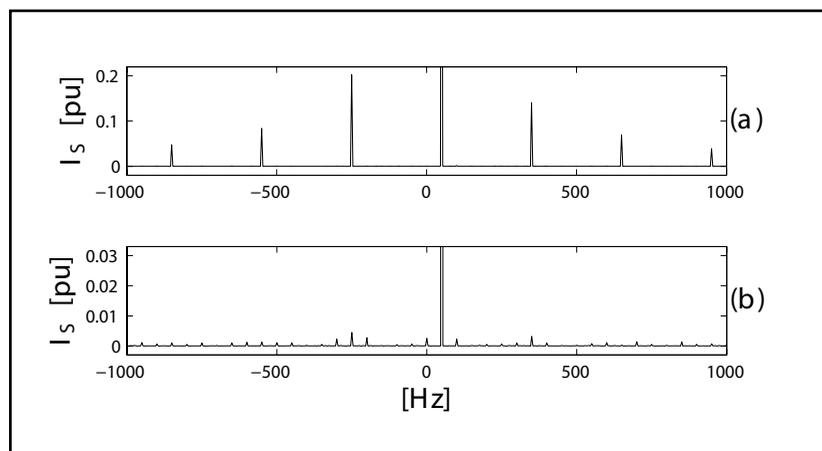


Figura 6. Espectro de  $I_S$  (tensión balanceada)

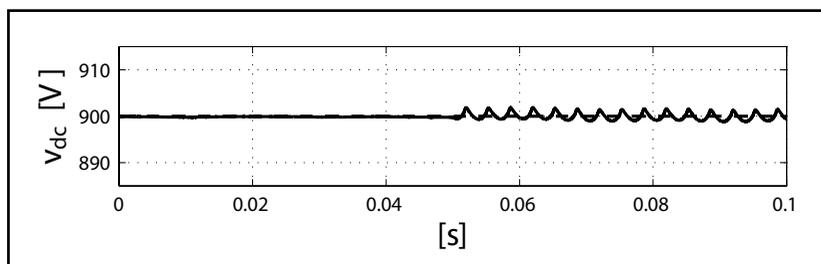


Figura 7. Tensión de la barra de CC para tensión de red balanceada

espectro de esta corriente para  $t \geq 0,05s$  (compensada).

Se puede observar que las componentes correspondientes al 7<sup>mo</sup>, 13<sup>er</sup> y 19<sup>no</sup> armónico, características de este tipo de carga no lineal, se reducen considerablemente (<1%) con la utilización del filtro propuesto. La distorsión armónica total (*Total Harmonic Distortion*, THD) de la corriente consumida desde la red antes de la compensación es del 26,8%, mientras que luego de la compensación el THD se reduce al 1,07%.

En la figura 7 se muestra la tensión de la barra de CC junto a su referencia. Como se puede observar en esta figura, la estrategia de control permite la regulación de  $v_{dc}$ , manteniéndola junto a su valor de referencia en el momento en que comienza a funcionar el SAF. Se observa que el *ripple* presente en dicha tensión a partir de los 0,05s se mantiene por debajo del 0,5%.

## 5.2 Tensión desbalanceada + armónicos

Para este ensayo se utiliza una tensión de línea trifásica sinusoidal, con un desbalance del 13% (según norma IEC) y con un 5% de 5<sup>to</sup> armónico y un 2% de 7<sup>mo</sup> armónico.

En la figura 8 se muestra la corriente de la fase a en distintos puntos del sistema para el ensayo

## Nota técnica

de conexión del filtro. En la figura 8 (a) y (b) se muestra la forma de onda de la corriente de compen-

sación ( $i_{Ca}$ ) y la corriente consumida de la red ( $i_{Sa}$ ), respectivamente, para el ensayo descrito.

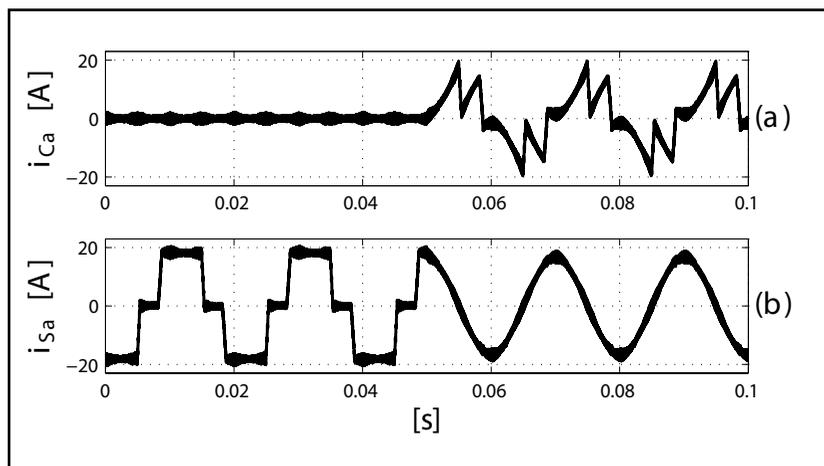


Figura 8. Corrientes en la fase a del sistema (tensión desbalanceada + armónicos)

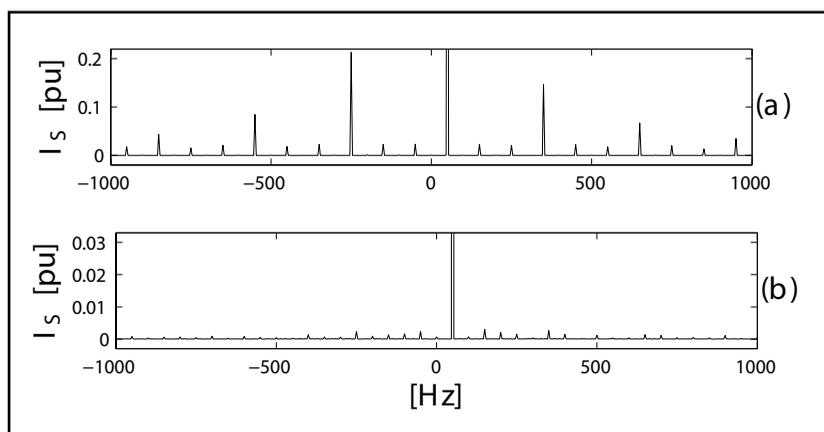


Figura 9. Espectro de  $I_S$  (tensión desbalanceada + armónicos)

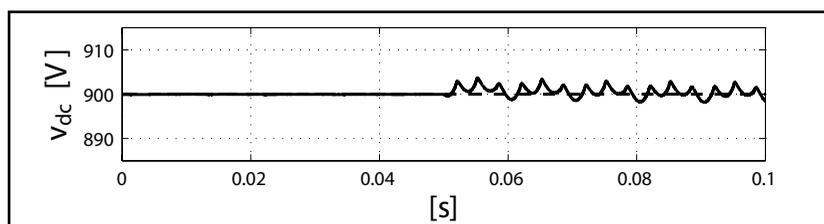


Figura 10. Tensión de la barra de CC para tensión desbalanceada + armónicos

En la figura 9 (a) se muestra el espectro de corriente para  $t < 0,05$  s (sin compensar) y en la figura 9 (b) se muestra el espectro de esta corriente para  $t \geq 0,05$  s (compensada). Debido al desbalance y las componentes armónicas presentes en la tensión de red, además de los armónicos característicos del tipo de carga considerada, aparecen componentes con baja amplitud en las frecuencias  $-50, \pm 150, +250, -350, \pm 450, \dots$  Hz.

Con la utilización del filtro propuesto las componentes armónicas resultan atenuadas hasta tener amplitudes menores al 1%. El THD de la corriente consumida desde la red, antes de la compensación es del 26,7% y luego de la compensación, del 0,96%.

En la figura 10 se muestra la tensión de la barra de CC junto a su referencia. Se observa que la estrategia de control permite la regulación de  $v_{dc}$  y que el *ripple* presente en dicha tensión a partir del momento en que se conecta el SAF se mantiene menor al 0,5%.

## 6. Conclusiones

En este trabajo se diseñó un control para un SAF utilizando la técnica IDA con el objetivo compensar las corrientes armónicas consumidas por una carga no lineal y de esta manera lograr que

la corriente entregada por la red sea sinusoidal pura y balanceada. Se utilizó la Teoría pq para determinar las referencias de las corrientes de compensación que deben ser sintetizadas por el convertidor.

El diseño se realizó utilizando un método constructivo para calcular la asignación de interconexión y amortiguamiento basado en técnicas de Lyapunov, que garantiza la convergencia a cero del error.

Se realizaron dos ensayos en simulación, uno para tensiones de red sinusoidales puras y balanceadas y otro para tensiones de red desbalanceadas y con armónicos.

En ambos ensayos se pudo observar que los armónicos propios del tipo de carga utilizada y los correspondientes a la distorsión en la tensión de red se reducen notablemente mediante la utilización del SAF con la estrategia de control propuesta.

### **Bibliografía**

1] *Por norma editorial, no se publican las referencias bibliográficas que dan sustento a este trabajo. Por consultas de esta índole o demás cuestiones referidas al tema tratado, contactar a Federico Serra, [fserra@ieee.org](mailto:fserra@ieee.org)*