

# Operación del convertidor Back-to-Back trifásico como compensador de potencia activa, reactiva y armónicos de corriente

J. Alcalá<sup>1</sup>, V. Cárdenas<sup>2</sup>, J. Pérez-Ramírez<sup>3</sup>, J. Lau<sup>1</sup>, R. Sierra<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Facultad de Ingeniería  
Electromecánica  
Universidad de Colima  
Manzanillo, Colima, México

<sup>2</sup>Facultad de Ingeniería  
Universidad Autónoma de San Luis  
Potosí  
San Luis Potosí, SLP, México

<sup>3</sup>Departamento de Ingeniería  
Eléctrica y Electrónica  
Instituto Tecnológico de Sonora,  
Cd. Obregón, Sonora, México

**Resumen**— En este artículo se presenta el estudio del convertidor Back-to-Back (BTB) trifásico como un compensador de potencia activa, que es capaz de resolver problemas de calidad de la energía al ampliar su capacidad operativa para suministrar simultáneamente potencia reactiva fundamental y compensar armónicos de corriente en el punto de acoplamiento común (PCC). La estrategia principal del esquema propuesto consiste en descomponer la corriente suministrada por el convertidor BTB en el PCC en tres componentes. La primera componente se utiliza para regular el flujo de la potencia activa de forma bidireccional, la segunda para compensar la potencia reactiva fundamental y la última para compensar los armónicos de corriente. Los resultados de simulación se evalúan en un sistema de 30 kVA y para las pruebas experimentales se utiliza un prototipo de laboratorio de 1 kVA.

**Palabras clave:** Convertidor Back-to-Back, Compensación activa, Compensación reactiva, Compensación armónica.

## I. INTRODUCCIÓN

La idea de controlar la transferencia del flujo de potencia a través de convertidores de electrónica de potencia no es nueva en sí misma; sin embargo, el avance logrado en dispositivos semiconductores ha permitido que los convertidores electrónicos incursionen cada vez más en aplicaciones muy diversas y de mayor potencia. Particularmente, el desarrollo de los controladores del flujo de potencia ha permitido regular libremente (dentro de las limitantes de la topología) y de forma independiente la potencia activa y reactiva en una diversa gama de aplicaciones industriales.

En relación al uso de convertidores electrónicos para el control del flujo de potencia, uno de los convertidores que ha tenido mayor impacto es el *Back-to-Back* (BTB), ya que permite interconectar dos sistemas de corriente alterna (CA) de características similares o diferentes (magnitud y/o frecuencia), así como controlar el flujo de potencia entre ambos (Rodríguez, 2005).

El convertidor BTB se utiliza ampliamente en aplicaciones que requieren controlar la potencia activa entre

dos sistemas de CA, dado que éste permite controlar el flujo de potencia en ambas direcciones, siempre y cuando el bus de corriente directa (CD) se mantenga regulado adecuadamente. Además, el convertidor BTB puede operar como un compensador síncrono estático (STATCOM, por sus siglas en inglés, *STATic synchronous COMPensator*) si se conecta en paralelo con el sistema de CA, esto con el fin de compensar la potencia reactiva fundamental; por lo anterior también se le suele llamar BTB-STATCOM (Sen *et al*, 2009).

En varios trabajos propuestos (Majumder *et al*, 2010), (Parkhideh *et al*, 2008), (Noroozian *et al*, 2003), se ha demostrado que el convertidor BTB es capaz de compensar la potencia reactiva en cada uno de los sistemas de CA al que está conectado. Recientemente, se ha prestado mucha más atención a la operación del convertidor BTB como filtro activo. En este sentido Zeliang propone utilizar el convertidor BTB como un compensador de potencia activa que es útil para resolver los problemas de suministro eléctrico en un sistema de tracción (Zeliang *et al*, 2011). El sistema adopta una conexión de alimentación monofásica y emplea el control por histéresis para regular la corriente inyectada al sistema. Thanh propone una estrategia de control por histéresis para minimizar la distorsión de la corriente de la red eléctrica generada por desbalances en el sistema (Thanh *et al*, 2012), y utiliza al convertidor BTB para llevarla a cabo. Los resultados de simulación y experimentales muestran que es posible reducir el contenido armónico; no obstante en esta aplicación no se requiere controlar el flujo de la potencia activa y compensar la reactiva. Gaillard propone el control de corriente por histéresis con ayuda del convertidor BTB, el objetivo de este trabajo es controlar una parte de la potencia activa generada por el viento a través del convertidor BTB y compensar al mismo tiempo la potencia reactiva y/o filtrar el contenido armónico (Gaillard *et al*, 2009). Los resultados muestran que es posible reducir el contenido armónico hasta un 32% del valor nominal; sin embargo no se evalúa la operación de compensación reactiva y el alcance de los resultados es únicamente en simulación.

En este trabajo se propone un esquema de operación que permite actuar al convertidor BTB trifásico como un compensador de potencia activa (bidireccional) capaz de

Este trabajo fue soportado y desarrollado por la Universidad de Colima en colaboración con la Universidad Autónoma de San Luis Potosí, bajo el marco de proyectos PROMEP con el número PROMEP/103.5/12/3421.

suministrar simultáneamente potencia reactiva a frecuencia fundamental para un factor de potencia (FP) en atraso (inductivo) o adelanto (capacitivo), y que además puede efectuar la función de filtro activo, al compensar los armónicos de corriente generados por cargas no lineales. El principio de operación consiste en separar la corriente inyectada por el convertidor BTB en el punto de acoplamiento común (PCC) en tres componentes. La primera componente se utiliza para compensar la potencia activa, la segunda para compensar la potencia reactiva fundamental y la última para compensar los armónicos de corriente. Para el control del flujo de potencia se emplea uno de los esquemas de control más utilizados en aplicaciones para convertidores tipo fuente de tensión (VSC, por sus siglas en inglés, *Voltage Source Converter*) que ha demostrado un buen desempeño al desacoplar las componentes activa y reactiva de los sistemas de CA (Parkhideh y Bhattacharya, 2008), y que se conoce como *control desacoplado de potencia*. Los resultados de simulación se evalúan en un sistema de 30 kVA y para las pruebas experimentales se utiliza un prototipo de laboratorio de 1 kVA.

## II. DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA

En la Fig. 1 se muestra un esquema general de la propuesta bajo estudio en este trabajo. El convertidor del lado de la red eléctrica CA<sub>1</sub> se denomina VSC<sub>1</sub> y el convertidor del lado de CA<sub>2</sub> se nombra como VSC<sub>2</sub>. Las cargas que se pueden conectar en ambos extremos pueden ser pasivas, activas o incluso otra red eléctrica. Ambos convertidores comparten un bus común CD a través del capacitor  $C_{cd}$ , el cual permite que ambos VSC se puedan controlar de manera independiente en cierto rango de potencia y además funciona como medio de almacenamiento de energía. Los convertidores VSC<sub>1</sub> y VSC<sub>2</sub> pueden actuar como un rectificador (convertidor CA-CD) o un inversor (convertidor CD-CA) en función de la dirección del flujo de potencia. Si se considera que el flujo de potencia es de CA<sub>1</sub> a CA<sub>2</sub>, entonces VSC<sub>1</sub> opera como rectificador y VSC<sub>2</sub> como inversor; si el flujo cambia, los papeles que desempeñan

VSC<sub>1</sub> y VSC<sub>2</sub> se invierten. Las flechas bidireccionales se utilizan para indicar que el flujo de potencia activa puede cambiar en cualquier momento y que la potencia reactiva que se compensa puede ser para FP en atraso o en adelanto. Para realizar la compensación de corriente armónica se identifican los armónicos de corriente de la carga o cargas no lineales, y estos mismos armónicos se inyectan en contrafase en el PCC. El convertidor BTB está acoplado a la red eléctrica a través de los inductores  $L_{1,2}$ ;  $R_{1,2}$  representa la resistencia asociada a los inductores. Los sistemas CA<sub>1</sub> y CA<sub>2</sub> se alimentan de la toma del secundario de los transformadores TR1 y TR2, respectivamente. Las tensiones  $v_1$  y  $v_2$  son las tensiones de fase. Las corrientes  $i_1$  e  $i_2$  son las corrientes de entrada y salida del convertidor BTB, respectivamente. Del lado de CA<sub>1</sub> se encuentra conectada permanentemente una carga lineal en PCC<sub>1</sub> y del lado de CA<sub>2</sub> se tienen una serie de cargas lineales y no lineales que se encuentran conectadas al PCC<sub>2</sub>, estas cargas se pueden conectar y/o desconectar del convertidor BTB utilizando el interruptor Sw. La corriente  $i_o$  es la corriente total demandada por las cargas lineales y no lineales conectadas al PCC<sub>2</sub>; ante la presencia de cargas no lineales, esta corriente tiene un contenido de componentes armónicas. La idea central de este trabajo consiste en inyectar una corriente  $i_2$  al PCC<sub>2</sub> para controlar el flujo de potencia activa en ambos sentidos, la potencia reactiva en terminales de CA<sub>2</sub> y los armónicos de corriente, todo simultáneamente; con la opción además de controlar la potencia reactiva en terminales de CA<sub>1</sub>. Estas tareas se pueden realizar siempre y cuando el bus de CD permanezca regulado adecuadamente, tal que:

$$P_1 = -P_2 \quad (1)$$

Es decir, que la potencia entregada por VSC<sub>1</sub> sea la potencia absorbida por VSC<sub>2</sub>, de aquí que la regulación del bus de CD se convierte en un objetivo de control indispensable.

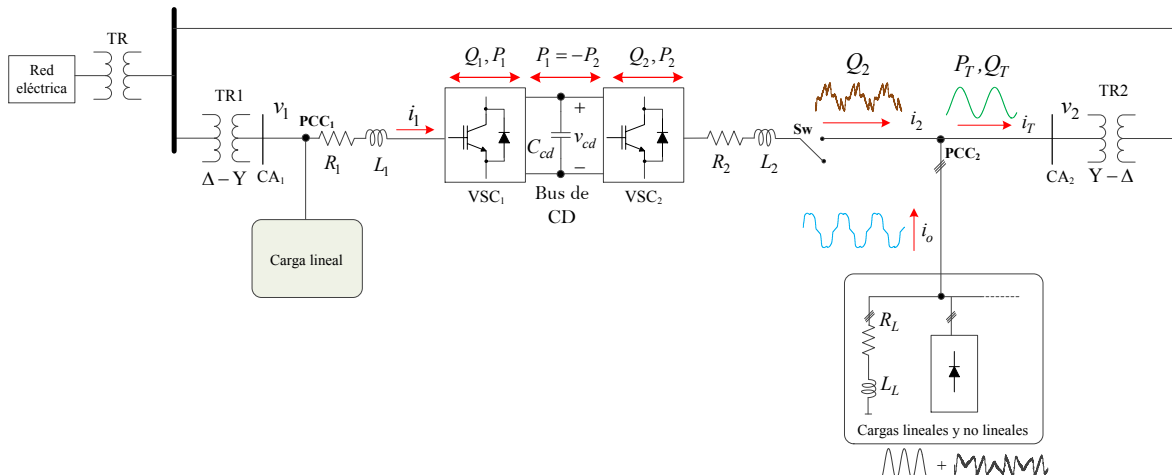


Fig. 1. Sistema de estudio propuesto.

### III. MODELADO DEL CONVERTIDOR BTB

El modelo matemático del convertidor BTB se mapea del marco de referencia  $abc$  al marco de referencia síncrono  $dq$ , asumiendo un sistema trifásico balanceado en conexión delta. La transformación DQ invariante en magnitud permite que el modelo trifásico del convertidor BTB se pueda expresar mediante las componentes directas ( $d$ ) y en cuadratura ( $q$ ); la componente  $d$  contiene información de la componente activa fundamental mapeada como un nivel de CD, mientras que la información que se mapea en la componente  $q$  representa la componente reactiva fundamental. El nivel de CD que corresponde a la magnitud de la señal en  $q$  es igual a cero si no existen desviaciones en magnitud y/o fase de las señales en CA. Adicionalmente, si existen armónicos, estos serán mapeados como una señal de CA en ambas componentes. Para obtener el modelo matemático del convertidor BTB se asume una tensión sin armónicos y cada transformación se sincroniza con el sistema de CA correspondiente.

El modelo matemático en  $dq$  para el convertidor BTB está dado por:

$$\frac{di_1^d}{dt} = -\frac{R_1}{L_1}i_1^d + \omega_1 i_1^q + \frac{1}{L_1}v_1^d - \frac{1}{2U_{T1}L_1}v_{cd}m_1^d \quad (2)$$

$$\frac{di_1^q}{dt} = -\frac{R_1}{L_1}i_1^q - \omega_1 i_1^d - \frac{1}{2U_{T1}L_1}v_{cd}m_1^q \quad (3)$$

$$\frac{di_2^d}{dt} = -\frac{R_2}{L_2}i_2^d + \omega_2 i_2^q + \frac{1}{L_2}v_2^d - \frac{1}{2U_{T2}L_2}v_{cd}m_2^d \quad (4)$$

$$\frac{di_2^q}{dt} = -\frac{R_2}{L_2}i_2^q - \omega_2 i_2^d - \frac{1}{2U_{T2}L_2}v_{cd}m_2^q \quad (5)$$

$$C_{cd} \frac{dv_{cd}}{dt} = \frac{3}{4} \left[ \frac{1}{U_{T1}} (m_1^d i_1^d + m_1^q i_1^q) + \frac{1}{U_{T2}} (m_2^d i_2^d + m_2^q i_2^q) \right] \quad (6)$$

donde los sub índices 1 y 2 se asocian a los convertidores VSC<sub>1</sub> y VSC<sub>2</sub> respectivamente;  $\omega_{1,2}$  representa la frecuencia angular de CA, los términos moduladores  $m_{1,2}^{d,q}$  son las entradas de control y  $U_{T1,2}$  son las amplitudes pico de las portadoras triangulares que se utilizan para generar el patrón de conmutación sinusoidal. El vector de estados está dado por las componentes  $dq$  de las corrientes trifásicas, así como de la tensión en el bus de CD  $[i_1^d \ i_1^q \ i_2^d \ i_2^q \ v_{cd}]^T$ ; las entradas de control son  $[m_1^d \ m_1^q \ m_2^d \ m_2^q]^T$ .

Las potencias activa (P) y reactiva (Q) se calculan a partir de (7) y (8). De esta forma, a partir del control de las componentes de corriente en  $dq$  es posible controlar el flujo de potencia activa y reactiva, ya que los términos en  $dq$  de la tensión se consideran términos no controlados.

$$P_{1,2} = \frac{3}{2} (V_{1,2}^d I_{1,2}^d + V_{1,2}^q I_{1,2}^q) \quad (7)$$

$$Q_{1,2} = \frac{3}{2} (V_{1,2}^q I_{1,2}^d - V_{1,2}^d I_{1,2}^q) \quad (8)$$

### IV. ESTRATEGIA DE CONTROL

Cuatro objetivos de control son planteados: 1) mantener el bus de CD regulado, 2) compensar la potencia activa, 3) suministrar la potencia reactiva requerida en terminales de cada uno de los sistemas de CA y 4) compensar los armónicos de corriente en el PCC<sub>2</sub>. Dado que VSC<sub>1</sub> y VSC<sub>2</sub> están desacoplados por el condensador del bus de CD, es posible controlarlos de manera independiente. En este trabajo, la función primordial de VSC<sub>1</sub> es mantener estable y regulada la tensión en el bus de CD y además, compensar la potencia reactiva en terminales de CA<sub>1</sub>. Por otro lado, VSC<sub>2</sub> debe mantener estable y regulada la potencia activa y compensar los armónicos de corriente. Al igual que para VSC<sub>1</sub>, también debe compensar la potencia reactiva, pero en este caso la compensación se realiza en terminales de CA<sub>2</sub>. Para alcanzar estos objetivos se adopta una estructura de control en cascada, que incluye lazos de control internos para VSC<sub>1</sub> y VSC<sub>2</sub>, y un lazo externo para VSC<sub>1</sub>. Los lazos de control internos se usan como lazo principal y determinan las acciones de conmutación para VSC<sub>1</sub> y VSC<sub>2</sub>. El objetivo del lazo de control externo es suprimir el efecto debido a incertidumbres en la referencia que utiliza el controlador interno para el bus de CD, ya que éste debe mantener estable la tensión de CD y regulada ante cualquier cambio de carga.

#### A. Compensación activa, reactiva y de armónicos de corriente

Para conseguir los objetivos propuestos la corriente  $i_2$  inyectada por el convertidor BTB (a través de VSC<sub>2</sub>) hacia el PCC debe tener las siguientes componentes:

$$i_2 = (i_2^d + i_2^{hd}) + (i_2^q + i_2^{hq}) \quad (9)$$

donde  $i_2^d$  e  $i_2^q$  representan las componentes activa, reactiva

de la corriente, respectivamente. Por otro lado,  $i_2^{hd}$  e  $i_2^{hq}$  son las componentes armónicas de la corriente que deben ser inyectadas para compensar la distorsión armónica de corriente. En la Fig. 2 se muestra el diagrama de control a bloques propuesto para realizar la compensación. Los términos  $P_2^*$  y  $Q_2^*$  son las referencias de potencia activa y reactiva respectivamente; éstos entran a un bloque para estimar las referencias de corriente activa ( $i_2^{d*}$ ) y reactiva ( $i_2^{q*}$ ) necesarias para compensar la potencia requerida.

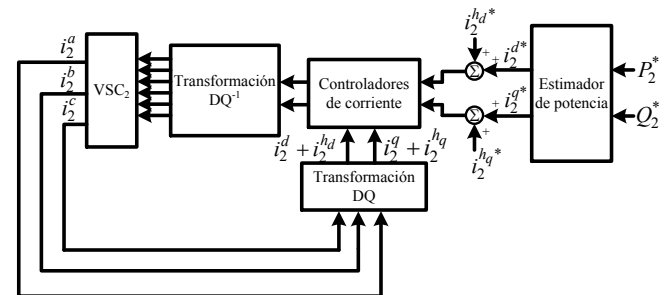


Fig. 2. Bloque de control para la compensación de potencia activa y reactiva incluyendo el filtrado de armónicos de corriente.

### B. Generación de la referencia para compensar los armónicos de corriente

En cuanto a la forma en que se generan las referencias de los armónicos de corriente  $i_2^{hd*}$  e  $i_2^{hq*}$ , existen varios métodos que se pueden utilizar para extraer el contenido armónico de la señal. En la Fig. 3 se muestra el diagrama a bloques que se utiliza para determinar el contenido armónico total en el PCC<sub>2</sub>. El método parte de obtener primero las componentes  $dq$  de la corriente total de carga.

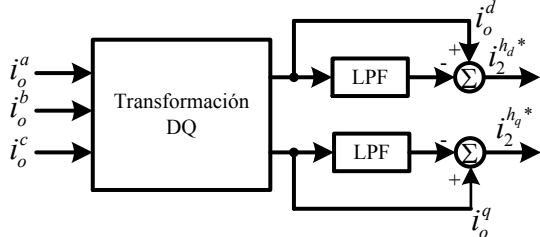


Fig. 3. Aislamiento de los armónicos de corriente de la carga total en el PCC<sub>2</sub>.

Al aplicar la transformación DQ, el contenido armónico total de corriente se mapea tanto en la componente en  $d$ , como en la componente en  $q$ . Es decir, la componente que se extraen en  $d$  se compone de un término de CD que se asocia exclusivamente a la potencia activa demandada por la carga, más un término de CA debido a la componente armónica; de forma similar ocurre para la componente en  $q$  de la corriente de carga. A la salida del bloque de transformación se colocan dos filtros paso bajo (LPF, por sus siglas en inglés, *Low Pass Filter*) iguales para cada una de las componentes; el filtro es del tipo Butterworth. El LPF permite extraer la componente en CD de la corriente, la cual se resta de la señal original para obtener las referencias de contenido armónico para cada una de las componentes (Akagi 1997).

Tomando las componentes en  $d$ ,  $q$  y  $h$  de la corriente como las variables a controlar, se propone la siguiente estrategia de control lineal:

$$\begin{aligned} m_2^d &= \frac{2U_{T2}}{v_{cd}^*} (\omega_2 L_2 i_2^{q*} - R_2 i_2^{d*} + v_2^d + i_2^{hd*}) - v_{21} \\ m_2^q &= \frac{2U_{T2}}{v_{cd}^*} (-\omega_2 L_2 i_2^{d*} - R_2 i_2^{q*} + v_2^q + i_2^{hq*}) - v_{22} \end{aligned} \quad (10)$$

en donde  $v_{cd}^*$  representan la referencia de la tensión del bus de CD. Por otro lado,  $v_{21}$  y  $v_{22}$  son señales de control auxiliares que contienen los controladores PI. Mediante (10) es posible cancelar las no linealidades y acoplamientos presentes de manera local, y de esta forma controlar de manera independiente las corrientes y por ende, la potencia activa, reactiva y los armónicos de corriente.

Las leyes de control de corriente para VSC<sub>1</sub> se obtienen bajo el mismo principio; es importante aclarar que del lado de CA<sub>1</sub> no se desea compensar el contenido armónico (aunque se puede realizar si así se desea), por ello el término  $i_1^h$  es cero. Se propone la siguiente estrategia de control:

$$\begin{aligned} m_1^d &= \frac{2U_{T1}}{v_{cd}^*} (\omega_1 L_1 i_1^{q*} - R_1 i_1^{d*} + v_1^d) - v_{11} \\ m_1^q &= \frac{2U_{T1}}{v_{cd}^*} (-\omega_1 L_1 i_1^{d*} - R_1 i_1^{q*} + v_1^q) - v_{12} \end{aligned} \quad (11)$$

en donde  $v_{11}$  y  $v_{12}$  son señales de control auxiliares que contienen los controladores proporcional-integral (PI).

El lazo de control externo para la tensión del bus de CD entrega la referencia de la componente activa de corriente  $i_1^{d*}$ . Este lazo controla la cantidad de potencia requerida para mantener la tensión de CD estable y regulada. En la Fig. 4 se muestra el diagrama a bloques del lazo para el bus de CD. El controlador PI regula el comportamiento de la tensión de CD y la corriente  $i_{cd2}$  representa la demanda de potencia dictada por VSC<sub>2</sub>.

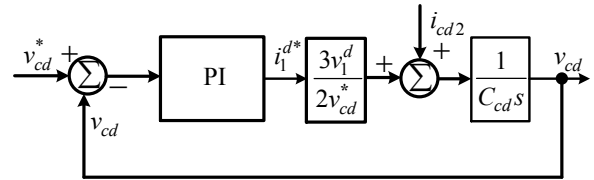


Fig. 4. Diagrama a bloques del lazo externo de CD en estado estable.

## V. RESULTADOS DE SIMULACIÓN

Para demostrar la validez de las derivaciones y desarrollos teóricos, a continuación se evalúa la operación del convertidor BTB con el esquema propuesto en la Fig. 1, incluyendo los transformadores. Las simulaciones se realizaron bajo las plataformas de Matlab/Simulink® y PSIM® con los parámetros mostrados en la Tabla I. Para la prueba, se consideran tres cargas. Las cargas se conectan al PCC<sub>2</sub> en diferentes momentos, los resultados se muestran en las Fig. 5 y 6. La primera es una carga lineal de 10 kW; la segunda es una carga no lineal compuesta por un rectificador de diodos de seis pulsos, con una carga resistiva de 20 kW; con esta carga, la distorsión armónica total (THD) en el PCC<sub>2</sub> es del 30.25%. La magnitud de los armónicos más significativos (quinto y séptimo) son 16.73 A y 5.97 A, respectivamente. La tercera es una carga inductiva de 10 kVA, con un factor de potencia de 0.1.

TABLA I  
PARÁMETROS DEL CONVERTIDOR BTB

Parámetro	Simulaciones	Experimentales
$S_{TRI,TR2}$	50 kVA	5 kVA
$V_{1,2}$	100 Vrms	35 Vrms
$\omega_{1,2}$	377 r/s	377 r/s
$L_1$	4.1 mH	4.1 mH
$L_2$	5.3 mH	5.3 mH
$R_1$	30 mΩ	284 mΩ
$R_2$	40 mΩ	330 mΩ
$V_{cd}$	550 V	150 V
$S$	30 kVA	1 kVA
$f_{sw}$	4.8 kHz	4.8 kHz
$U_{T1,2}$	5 V	5 V
$C_{cd}$	4700 μF	1050 μF

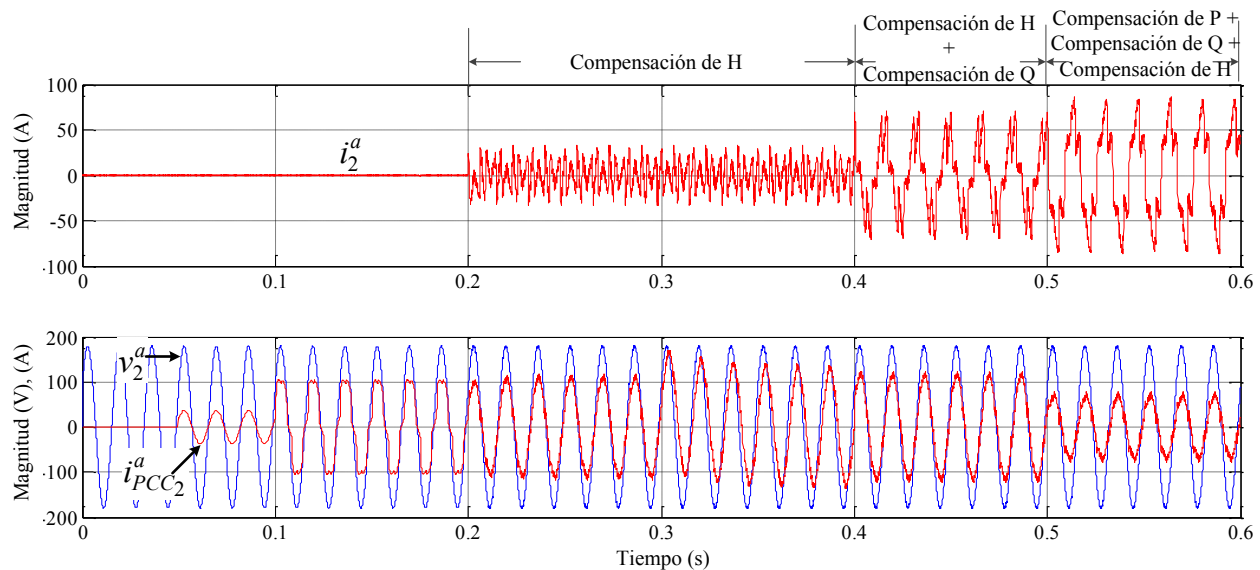


Fig. 5. Operación del convertidor BTB como compensador de armónicos de corrientes, potencia reactiva y potencia activa, simultáneamente.

En la Fig. 5, de arriba hacia abajo se muestra la corriente de fase  $a$  ( $i_{PCC_2}^a$ ) inyectada por el convertidor BTB en el PCC<sub>2</sub>, así como la tensión y corriente medidas en este mismo nodo. Inicialmente el interruptor Sw está abierto, y el convertidor BTB no opera. La primera carga lineal se conecta al PCC en  $t = 0.05$  s. Posteriormente, en  $t = 0.1$  s se conecta la carga no lineal; se observa que la corriente medida en terminales del PCC se distorsiona debido al contenido armónico demandado por la carga no lineal; en  $t = 0.2$  s se activa el interruptor Sw. El algoritmo de control determina el contenido armónico total de la carga no lineal y envía la referencia al convertidor BTB, por lo que éste se encarga de compensar la corriente armónica en exclusiva. Se puede observar que la corriente total de la fase  $a$ , es casi sinusoidal. Después de la compensación, los armónicos quinto y séptimo se redujeron un 75% y 88%, respectivamente. La tercera carga se activa en  $t = 0.30$  s, se observa que la corriente atrasa a la tensión después del transitorio; a continuación, en  $t = 0.4$  s el convertidor de BTB se controla para compensar la potencia reactiva demanda por la carga. Una vez que el convertidor BTB compensa la potencia reactiva a frecuencia fundamental, la corriente vista en el PCC<sub>2</sub> está en fase con la tensión. De esta forma, a partir de  $t = 0.2$  s, el convertidor de BTB puede compensar simultáneamente los armónicos de corriente y la potencia reactiva. Por último, para liberar de carga a TR2, en  $t = 0.5$  s se le pide al convertidor BTB transferir 10 kW del sistema CA<sub>1</sub> al sistema CA<sub>2</sub>; puede observarse que la corriente medida en el PCC disminuye de 104 A a 67 A. De esta forma, de  $t = 0.5$  s a  $t = 0.6$  s, el convertidor BTB compensa los armónicos de corriente, la potencia reactiva y la potencia activa, simultáneamente.

En la Fig. 6 se muestra la operación del convertidor BTB para el caso en el que se transfieren 10 kW del sistema CA<sub>2</sub> al sistema CA<sub>1</sub>; el caso contrario mostrado en la Fig. 5, se observa que de  $t = 0.6$  s a  $t = 0.7$  s la corriente se incrementa

debido a que ahora TR2 debe suministrar 10 kW más. Lo anterior demuestra la flexibilidad del sistema para compensar la potencia activa en cualquier dirección.

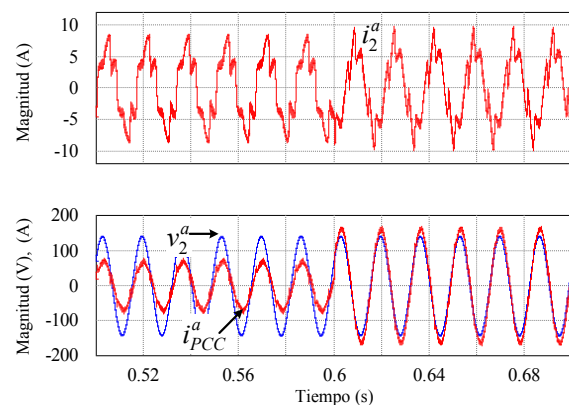


Fig. 6. Inversión del flujo de potencia activa.

## VI. RESULTADOS EXPERIMENTALES

El sistema de control propuesto se implementó usando la tarjeta ds1102 de dSPACE® operando a través de Matlab/Simulink® RTW. Para el esquema de potencia se desarrolló un prototipo BTB con capacidad de 1 kVA, con los parámetros mostrados en la Tabla I. En la Fig. 7 se muestra el prototipo experimental. Los resultados se muestran en las Figs. 8 a 10.

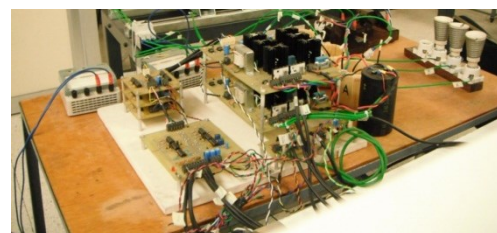


Fig. 7. Prototipo experimental.

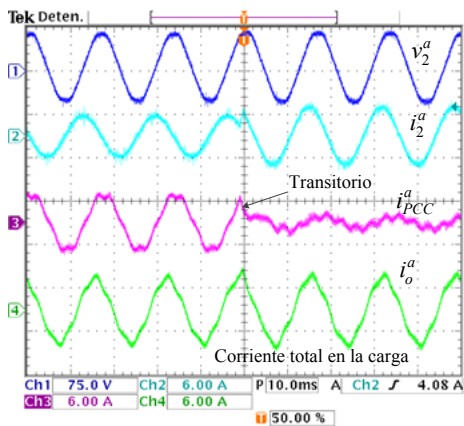


Fig. 8. Compensación de potencia activa y reactiva a frecuencia fundamental. Tensión en CA<sub>2</sub>-CH1, CH4 (75V/div), corrientes de fase *a* – en CH1, CH3, CH4 (6A/div): inyectada por el BTB, en el PCC y de carga.

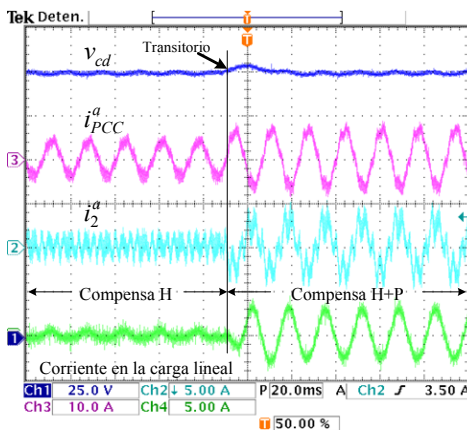


Fig. 9. Compensación de armónicos de corriente y de potencia activa. Tensión en el bus de CD-CH1 (25V/div), Corriente de fase *a* en el PCC-CH3 (10A/div), Corriente de fase *a* inyectada por el BTB-CH2 (5A/div), y corriente de la carga lineal-CH4, (5A/div).

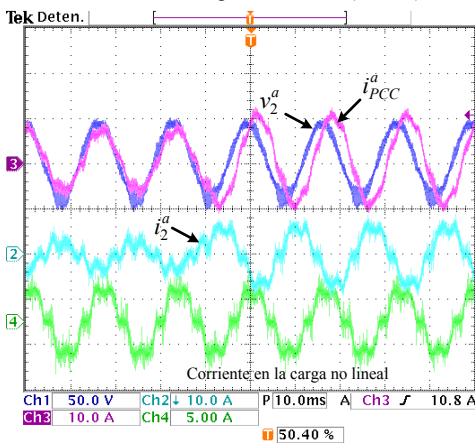


Fig. 10. Compensación de armónicos de corriente, potencia activa y potencia reactiva. Tensión en CA<sub>2</sub>-CH1 (50V/div), Corriente de fase *a* en el PCC-CH3 (10A/div), Corriente de fase *a* inyectada por el BTB-CH2 (10A/div), y corriente de la carga no lineal-CH4, (5A/div).

En la Fig. 8, inicialmente se tienen conectadas en el PCC<sub>2</sub> un arreglo de cargas lineales y no lineales que consumen 430 VA, posteriormente, se aplica un transitorio en el que se pide al convertidor BTB compensar 270 W y 270 VAR. Se puede apreciar, que la corriente disminuye y la fase se mueve, sin embargo, como el BTB sólo inyectó componente

fundamental reactiva, los armónicos de corriente de la carga quedan circulando en la red. En la Fig. 9 se muestra la respuesta dinámica para el caso en que inicialmente el BTB compensa los armónicos de una carga no lineal de 600W, posteriormente se activa una carga lineal de 600 W y se pide al convertidor BTB compensar únicamente 450 W de la carga total. Por último, en la Fig. 10 se muestra la respuesta dinámica para el caso en que inicialmente el BTB compensa los armónicos de una carga no lineal de 600 W y compensa 450 W, posteriormente, se aplica un escalón y se activa una carga inductiva de 450 VA, al mismo tiempo se le pide al convertidor BTB compensar 300 VAR; es decir, simultáneamente compensa la potencia activa, reactiva y los armónicos de corriente.

## VII. CONCLUSIONES

En este trabajo se presentó un enfoque que permite utilizar al convertidor BTB como un compensador de flujo de potencia activa, reactiva, y simultáneamente como un filtro activo capaz de compensar los armónicos de corriente. La estrategia clave es tomar ventaja de la independencia lineal de las componentes de la corriente. A través de una separación de los armónicos de corriente es posible compensar la potencia activa y reactiva y minimizar la distorsión armónica total en el PCC. Una de las principales ventajas de este método es la capacidad para compensar totalmente la corriente armónica asociada a las cargas no lineales, y la flexibilidad para compensar la potencia activa y reactiva.

## REFERENCIAS

- Rodríguez, J. R., Dixon, J. W., Espinoza, J R., Pontt, J. and Lezana, P., "PWM Regenerative Rectifiers: State of the Art," *IEEE Trans. on Industrial Electronics*, vol. 52, pp. 5-22, Feb 2005.
- Sen, K., and Ling Sen, M., "Introduction to FACTS Controllers: Theory, Modeling, and Applications", Wiley, 2009.
- Majumder, R., Ghosh, A., Ledwich, G. and F. Zare, "Power Management and Power Flow Control With Back – to – Back Converters in a Utility Connected Microgrid," *IEEE Trans. Power Sys.*, vol. 25, no. 2, pp. 821 – 834, May 2010.
- Parkhideh, B. and Bhattacharya, S., "A Practical Approach to Controlling the Back – to – Back Voltage Source Converter System," *Proc. 2008 IEEE Industrial Electronics Society Conf.*, vol. 38, pp. 514 – 519.
- Noroozian, M., Edris, A.-A., Kidd, D.E., and Keri, A.J.E., "The Potential Use of Voltage – Sourced Converter – Based Back – to – Back Tie in Load Restorations," *IEEE Trans. Power Del.*, vol. 18, no. 4, pp. 1416 – 1421, Oct. 2003.
- Zeliang Shu, Shaofeng Xie, and Qunzhan Li, "Single-Phase Back-To-Back Converter for Active Power Balancing, Reactive Power Compensation, and Harmonic Filtering in Traction Power System," *IEEE Trans. on Power Electronics*, vol. 26, no. 2, pp. 334 – 353, Feb. 2011.
- Thanh Hai Nguyen and Dong-Chong Lee, "Control of Three-Phase Grid Converters Based on Composite Observer for Unbalanced and Distorted Grid Voltage," *Proc. 2012 IEEE International Symposium on Industrial Electronics (ISIE)*, pp. 1874-1879. 2012.
- Gaillard, A., Poure, P., Saadate S., and Machmoum, M., "Variable speed DFIG wind energy system for power generation and harmonic current mitigation", *ELSEVIER, Renewable Energy*, vol. 34, no. 6, pp. 1545-1553, Jan 2009.
- Hirofumi Akagi, "Control Strategy and Site Selection of a Shunt Active Filter for Damping of Harmonic propagation in Power Distribution Systems" *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 12, no. 1, pp. 354-363, Jan 1997.