

Convertidor BTB Monofásico de Tres Puertos con Control Bidireccional de Potencia Activa y Compensación de Potencia Reactiva

M. Hernández*, V. Cárdenas*, J. Almaguer*, J. Alcalá**, F. Pazos*

*Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de San Luis Potosí, San Luis Potosí, SLP, México

**Facultad de Ingeniería Electromecánica, Universidad de Colima, Manzanillo, Colima, México
marco_8918@hotmail.com, vcardena@uaslp.mx, jorge.almaguer@alumnos.uaslp.edu.mx, janethalcala@ucol.mx, fpazos@uaslp.mx

Resumen: En este trabajo se presenta el análisis de un convertidor *Back-to-Back* (BTB por sus siglas en inglés) monofásico de tres puertos, basado en convertidores fuente de tensión (VSC) para el control bidireccional de potencia activa entre tres sistemas de CA interconectados. El sistema incorpora la capacidad de compensación de potencia reactiva en cada sistema de CA. La estrategia de control está basada en una linealización de un sistema no lineal, a la cual se le aplica una estrategia de control lineal en el marco de referencia dq , lo que permite un control independiente de potencia activa y reactiva. La validación del sistema se verifica a través de simulaciones de un convertidor BTB de 30 kVA.

Palabras clave: Convertidor BTB multipuerto, Linealización, Convertidores fuente de tensión, Flujo bidireccional de potencia activa, Compensación reactiva.

1. INTRODUCCION

En los últimos años, el uso de energías renovables para la generación de energía eléctrica en el mundo se ha intensificado de forma significativa. Entre las energías renovables con tecnologías maduras y competitivas en costos, en relación a los esquemas convencionales, se encuentran los sistemas eólicos, fotovoltaicos y las microturbinas. La incorporación de estas fuentes alternas de energía, así como la proliferación de su uso en sistemas de baja y media tensión, ha generado nuevos retos para la operación y gestión de los sistemas eléctricos en todos los niveles de potencia. La electrónica de potencia y los sistemas de control provén herramientas fundamentales para lograr la incorporación de estas fuentes a los sistemas eléctricos. La función primaria de la electrónica de potencia es acoplar la energía generada a la red eléctrica, garantizando la máxima transferencia de potencia ante condiciones variables de generación y operativas de la red. Es posible interconectar varias fuentes de energía a través de un solo convertidor electrónico si la estructura de éste lo permite, y cuenta con varios puertos de entrada de energía. De esta forma se puede maximizar la eficiencia en el equipo de acoplamiento y optimizar la estructura y tamaño del convertidor de potencia.

El convertidor de electrónica de potencia denominado *back-to-back* (BTB) es ampliamente usado en procesos industriales y aplicaciones de sistemas eléctricos de potencia, tales como Transmisión de Corriente Directa en Alta Tensión (HVDC), Cargas Electrónicas [Li et al. 2008], Sistemas de Alimentación Ininterrumpible (UPS) [Patidhar and Singh, 2008; Chen et al. 2008], entre otras. El convertidor BTB opera como un convertidor de potencia de CA/CA; puede estar formado por convertidores tipo fuente de corriente (CSC) o fuente de tensión (VSC) acoplados a través de un

bus de CD; VSC es la configuración más usada. Esta configuración presenta ventajas en términos de procesamiento de potencia, ya que permite el flujo bidireccional de energía con corrientes casi sinusoidales con un factor de potencia próximo a la unidad. Además cada VSC puede, de forma independiente, compensar potencia reactiva en las terminales de cada conexión de CA. El convertidor BTB de tres puertos basado en VSC cuenta con tres entradas/salidas de CA y tiene la capacidad de operar de tres maneras. En la primera opción dos convertidores VSC suministran potencia a un tercero, que actúa como puerto de salida acoplado la carga y manteniendo regulado el bus de CD. En la segunda opción sólo un VSC entrega potencia, y los otros dos actúan como salidas acopladas a cargas absorbiendo la potencia y manteniendo regulado el bus de CD. En la tercera opción, ningún convertidor VSC entrega potencia, manteniendo regulado el bus de CD.

En trabajos anteriores se han reportado estrategias de control donde los controladores de corriente para acoplar la potencia al puerto de CA están basados en esquemas PI [Nasiri and Emadi, 2003]; sin embargo estos esquemas presentan acoplamientos, y no proporcionan un control independiente de potencia activa y reactiva. En este trabajo se analiza la operación de un tercer puerto acoplado a un mismo bus de CD en un convertidor BTB monofásico, manteniendo la interacción entre los tres puertos. Cada VSC se controla por separado; esto es posible porque los convertidores se pueden desacoplar a través del condensador del bus de CD [Majumber et al, 2010; Parqhideh and Bhattacharya, 2008]. El conocimiento de las restricciones físicas del convertidor permite identificar los alcances de la ley de control, así como las limitaciones inherentes a la estructura de potencia.

La organización del artículo está dada de la siguiente manera: en la segunda sección se presenta el desarrollo del modelo del

sistema en el marco de referencia dq , las restricciones físicas del sistema, así como la región lineal de operación para la transferencia de potencia activa y compensación reactiva. En la sección tres se detalla la ley de control basada en la técnica de linealización entrada salida, el diseño de los controladores y el análisis de la dinámica cero. En la sección cuatro se presentan los resultados de simulación. El desempeño del convertidor se valida a través de simulaciones con un sistema de tres puertos y una capacidad nominal de 30 kVA en todo el sistema, 10 kVA por puerto. Finalmente se presentan las conclusiones de este trabajo.

2. PRINCIPIO DE OPERACION

La configuración del sistema propuesto se muestra en la fig. 1(a) y el modelo promedio del circuito equivalente en la fig. 1(b). La estructura del convertidor BTB de tres puertos monofásico se basa en convertidores VSC los cuales utilizan dispositivos semiconductores como IGBT o MOSFET. El esquema completo está formado por tres convertidores modulados por ancho de pulso (PWM por sus siglas en inglés), acoplados mediante un bus de CD. Las fuentes de tensión v_1 , v_2 y v_3 corresponden a las tres fuentes de alimentación. Los inductores L_1 , L_2 y L_3 son los inductores de enlace para acoplar los puertos del BTB con las fuentes de alimentación. Las resistencias R_1 , R_2 y R_3 están asociadas a los inductores de enlace; y el condensador C_{cd} acopla los buses de CD de cada uno de los convertidores VSC.

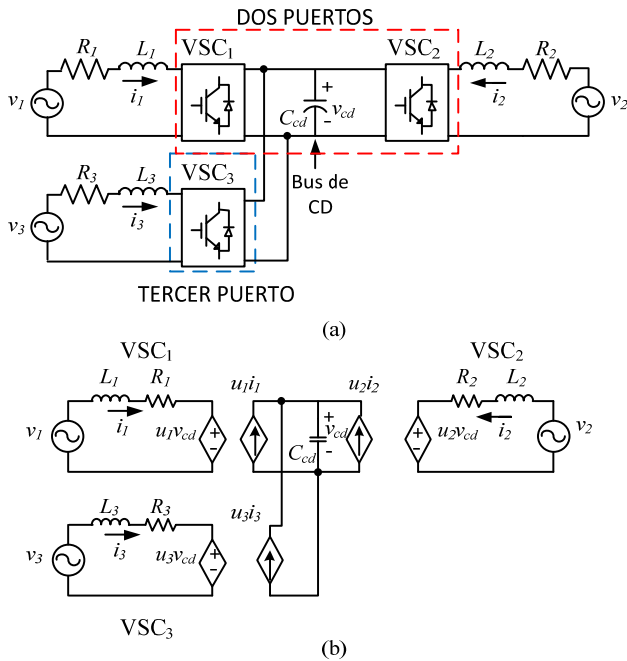


Fig. 1. Convertidor BTB monofásico de tres puertos. (a) Configuración de potencia. (b) Circuito equivalente.

En el modelo promedio se considera que la frecuencia de conmutación es alta comparada con la frecuencia fundamental del sistema eléctrico, y es posible minimizar el efecto de la conmutación a través del filtrado inherente de corriente en los inductores de enlace. El modelo matemático del convertidor BTB es del tipo no lineal porque las variables

de estado son multiplicadas por las entradas de control. Considerando las ecuaciones de malla de la fig. 1(b) y despreciando el efecto de la conmutación [Mohan, 2009], se obtiene el modelo promedio que describe el comportamiento del convertidor BTB de tres puertos (1). Los subíndices 1, 2, 3 hacen referencia a cada uno de los convertidores respectivamente.

$$\begin{aligned} L_1 \frac{di_1}{dt} &= -R_1 i_1 + v_1 - u_1 v_{cd} \\ L_2 \frac{di_2}{dt} &= -R_2 i_2 + v_2 - u_2 v_{cd} \\ L_3 \frac{di_3}{dt} &= -R_3 i_3 + v_3 - u_3 v_{cd} \\ C \frac{dv_{cd}}{dt} &= u_1 i_1 + u_2 i_2 + u_3 i_3 \end{aligned} \quad (1)$$

Para lograr la transferencia de potencia activa y el control de la potencia reactiva, es necesario regular la fase y amplitud de cada una de las corrientes sinusoidales que fluyen entre el convertidor BTB y las fuentes de alimentación. Trabajos previos reportan las limitaciones del sistema de control para el correcto seguimiento de referencias sinusoidales. Por lo tanto, en este trabajo se hace uso de la transformación dq , donde las señales sinusoidales de tensión y corriente son expresadas por dos componentes dq en un marco giratorio síncrono. Las componentes dq proporcionan información de la amplitud y fase; y están directamente asociadas con la potencia activa (d) y reactiva (q) [González et al, 2004]; así, los objetivos de control pueden lograrse regulando las componentes dq . El modelo en dq está dado por (2), donde u_1^{dq} , u_2^{dq} y u_3^{dq} representan las señales de modulación en el marco de referencia dq , las cuales deben cumplir la restricción $(u_{1,2,3}^d)^2 + (u_{1,2,3}^q)^2 \leq 1$ para evitar la sobre-modulación. ω es la frecuencia angular de las fuentes de tensión sinusoidales, siendo la misma para las tres fuentes; u_r es la amplitud pico de la señal portadora considerando un esquema de modulación sinusoidal.

$$\begin{aligned} L_1 \frac{di_1^d}{dt} &= -R_1 i_1^d + \omega L_1 i_1^q + v_1^d - \frac{u_1^d}{u_r} v_{cd} \\ L_1 \frac{di_1^q}{dt} &= -R_1 i_1^q - \omega L_1 i_1^d - \frac{u_1^q}{u_r} v_{cd} \\ L_2 \frac{di_2^d}{dt} &= -R_2 i_2^d + \omega L_2 i_2^q + v_2^d - \frac{u_2^d}{u_r} v_{cd} \\ L_2 \frac{di_2^q}{dt} &= -R_2 i_2^q - \omega L_2 i_2^d - \frac{u_2^q}{u_r} v_{cd} \\ L_3 \frac{di_3^d}{dt} &= -R_3 i_3^d + \omega L_3 i_3^q + v_3^d - \frac{u_3^d}{u_r} v_{cd} \\ L_3 \frac{di_3^q}{dt} &= -R_3 i_3^q - \omega L_3 i_3^d - \frac{u_3^q}{u_r} v_{cd} \\ C_{cd} \frac{dv_{cd}}{dt} &= \frac{(u_1^d i_1^d + u_1^q i_1^q) + (u_2^d i_2^d + u_2^q i_2^q) + (u_3^d i_3^d + u_3^q i_3^q)}{2u_r} \end{aligned} \quad (2)$$

Debido a que las tensiones de entrada son términos sinusoidales y se consideran en fase, las tensiones $v_i^q = 0$.

2.1 Requerimientos de operación

El convertidor BTB monofásico debe mantener el nivel de tensión del bus de CD constante para permitir la operación de los convertidores VSC y la transferencia de potencia activa. Como la potencia reactiva no se transmite entre puertos a través del bus CD, el control de dicha potencia se gestiona entre la fuente de CA y su VSC correspondiente. Cada convertidor VSC puede cumplir con dos objetivos de control; la decisión de dividir los objetivos es completamente arbitraria. Para este trabajo se asume que los tres VSC tienen la misma capacidad de potencia, y por lo tanto pueden cumplir los objetivos de manera indistinta.

2.2 Región lineal de operación

La región lineal de operación del convertidor BTB es la representación gráfica de todos los puntos de equilibrio, determinados por las restricciones que imponen las entradas de control y los niveles de tensión [Espinoza et al. 2005]. La región lineal de operación garantiza la transferencia de potencia entre los VSC sin tener sobre-modulación. Con $u_T = 1$, la restricción para evitar sobre-modulación es:

$$\left(u_{1,2,3}^d\right)^2 + \left(u_{1,2,3}^q\right)^2 < 1 \tag{3}$$

Los puntos de equilibrio del sistema se determinan igualando a cero las ecuaciones en (2), y resolviendo en función de las señales de control. Con $R_i = 0$ se obtiene:

$$I_1^d = -\frac{U_1^q V_{cd}}{\omega L_1} \quad I_1^q = -\frac{U_1^d V_{cd} - V_1^d}{\omega L_1} \tag{4}$$

$$I_2^d = -\frac{U_2^q V_{cd}}{\omega L_2} \quad I_2^q = -\frac{U_2^d V_{cd} - V_2^d}{\omega L_2} \tag{5}$$

$$I_3^d = -\frac{U_3^q V_{cd}}{\omega L_3} \quad I_3^q = -\frac{U_3^d V_{cd} - V_3^d}{\omega L_3} \tag{6}$$

Las expresiones generales para la potencia activa y reactiva de los convertidores están definidas por:

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

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

Las expresiones (9-10) se obtienen evaluando (4) en (7) para los valores máximos y mínimos de la entrada de control.

$$-\frac{\left(V_1^d V_{cd}\right)}{2\omega L_1} \leq P_1 \leq \frac{\left(V_1^d V_{cd}\right)}{2\omega L_1} \tag{9}$$

$$\frac{\left(V_1^d - V_{cd}\right)}{2\omega L_1} V_1^d \leq Q_1 \leq \frac{\left(V_1^d + V_{cd}\right)}{2\omega L_1} V_1^d \tag{10}$$

Donde $l = 1, 2, 3$. Mapeando los valores de la señales de control que satisfacen (3), en las ecuaciones (9-10) se obtiene la región de operación de potencia activa y reactiva. Los parámetros del sistema se determinan en función de la potencia nominal de operación y de las tensiones de entrada. Considérese un convertidor con una capacidad de 30 kVA (10 kVA por puerto); en la Tabla 1 se muestran los parámetros de operación. Como ejemplo, la fig. 2 muestra los límites de transferencia de potencia para VSC₁. Las coordenadas (x,y) representan los valores de las entradas de control en dq , y el gradiente de colores indica la potencia activa y reactiva que se transmite. Para el sistema propuesto, la máxima potencia activa a transferir es de 47.6 kW, fig. 2(a).

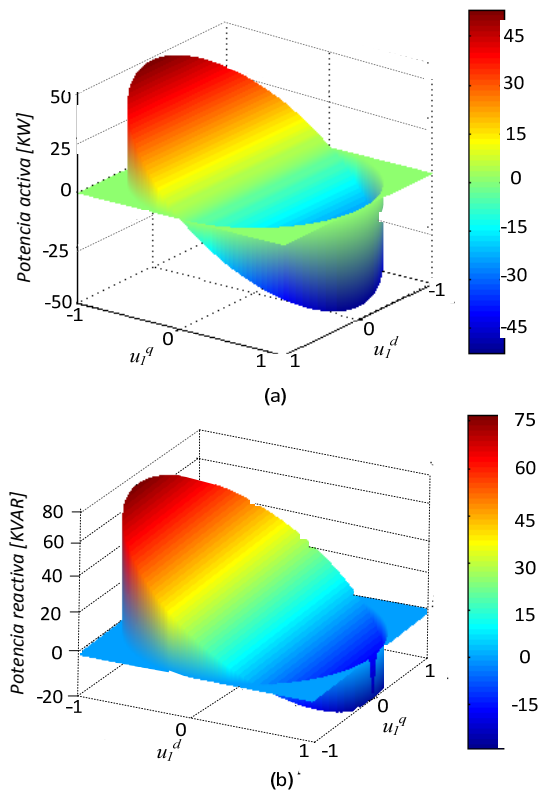


Fig. 2. Región de operación para VSC₁. (a) Transferencia de potencia activa. (b) Transferencia de potencia reactiva.

Tabla 1. Parámetros del sistema

Parámetro	Valor	Parámetro	Valor
v_1, v_2, v_3	254 V _{RMS}	L_1, L_2, L_3	6 mH
V_1^d, V_2^d, V_3^d	359.21 V	R_1, R_2, R_3	64.5 mΩ
ω	377 r/s	C_{cd}	3875 μF
v_{cd}	600 V	U_T	1 V
		f_{sw}	4980 Hz

3. ESTRATEGIA DE CONTROL

Los objetivos de control son mantener el flujo bidireccional de potencia activa, compensar la potencia reactiva y regular

el bus de CD. Para lograr estos objetivos, se plantea el uso de controladores en cascada con lazos internos y externos. Para el control de VSC₁, VSC₂ y VSC₃, los controladores internos de corriente se desarrollan bajo la estrategia de control de linealización por retroalimentación. Los controladores clásicos PI se usan para controlar los lazos externos. El controlador de la tensión en el bus de CD se estabiliza en un punto de operación específico.

Se considera que los lazos externos de VSC₁ y VSC₃ controlan la potencia activa y reactiva, y los lazos externos de VSC₂ regulan la tensión en el bus de CD y potencia reactiva. Los lazos internos se usan para controlar las corrientes de cada VSC. Los lazos internos se consideran más rápidos y los lazos externos se consideran más lentos. La ley de control proporciona el desempeño deseable en estado estable, y garantiza un rápido seguimiento de las corrientes de referencia en la región de operación. Basado en la región lineal de operación del convertidor BTB se garantiza el cumplimiento de los objetivos de control, pues la cota de potencia activa y reactiva del convertidor no será superada.

3.1 Estrategia de control no lineal

El modelo de un VSC del convertidor BTB de tres puertos en estado estable se puede representar como:

$$\begin{aligned} \frac{di_l^d}{dt} &= \omega i_l^q - \frac{R_l}{L_l} i_l^d + \frac{v_l^d}{L_l} - \frac{v_{cd}}{U_T L_l} u_1^d \\ \frac{di_l^q}{dt} &= -\omega i_l^d - \frac{R_l}{L_l} i_l^q - \frac{v_{cd}}{U_T L_l} u_1^q \\ \frac{dv_{cd}}{dt} &= \frac{i_l^d v_l^d}{2C_{cd} v_{cd}} + \frac{i_{cd2}}{C_{cd}} + \frac{i_{cd3}}{C_{cd}} \end{aligned} \quad (11)$$

Donde $x = [i_l^d \quad i_l^q \quad v_{cd}]^T$. En (11) se toma de referencia a VSC₁. De acuerdo a la teoría de linealización entrada-salida [Khalil, 1996], un sistema entrada-salida es linealizable mientras exista una ley de control, tal que:

$$\mathbf{u}(x) = -\mathbf{E}^{-1}(x) \begin{bmatrix} L_f^{\rho_1} h_1(x) \\ \vdots \\ L_f^{\rho_m} h_m(x) \end{bmatrix} + \mathbf{E}^{-1}(x) \begin{bmatrix} v_1 \\ \vdots \\ v_m \end{bmatrix} \quad (12)$$

Se denomina a $\mathbf{E}(x)$ matriz de desacoplo del sistema, ρ es el grado relativo del sistema y v denota la variable auxiliar de control. Calculando las derivadas de Lie se obtiene (13).

$$\mathbf{E}^{-1}(x) = \begin{bmatrix} \frac{-U_T L_1}{x_3} & 0 \\ 0 & \frac{-U_T L_1}{x_3} \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} L_f^{\rho_1} h_1(x) \\ \vdots \\ L_f^{\rho_m} h_m(x) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \omega x_2 - \frac{R_l x_1}{L_l} + \frac{v_1^d}{L_l} \\ \omega x_1 - \frac{R_l x_2}{L_l} \end{bmatrix} \quad (13)$$

La ley de control se obtiene usando (12). Esta ley de control existe para todo $v_{cd} \neq 0$.

$$\begin{aligned} u_1^d &= \frac{L_1 u_T}{x_3} \left[\omega x_2 - \frac{R_l}{L_l} x_1 + \frac{v_1^d}{L_l} - v_1 \right] \\ u_1^q &= \frac{L_1 u_T}{x_3} \left[-\omega x_1 - \frac{R_l}{L_l} x_2 - v_2 \right] \end{aligned} \quad (14)$$

La ley de control anterior convierte al sistema no lineal (11) en un mapeo lineal de la entrada a la salida:

$$\begin{aligned} \dot{y}_1 &= v_1 \\ \dot{y}_2 &= v_2 \end{aligned} \quad (15)$$

Las entradas del control auxiliar en el dominio de Laplace están dadas por un controlador PI [Alcala, 2010]:

$$\begin{aligned} \frac{y_1}{y_1^*} &= \frac{k_{p11}s + k_{i11}}{s^2 + k_{p11}s + k_{i11}} \\ \frac{y_2}{y_2^*} &= \frac{k_{p12}s + k_{i12}}{s^2 + k_{p12}s + k_{i12}} \end{aligned} \quad (16)$$

El término integral absorbe las incertidumbres presentes en el sistema y minimiza la sensibilidad a desviaciones en los valores de los parámetros. Para el controlador PI se propone $k_p=3134$, $k_f=6000$; con estos valores se logra un ancho de banda de una década inferior a la frecuencia de conmutación, con lo cual se garantiza el desacoplo y se cumple el criterio de Routh Hurwitz. La frecuencia de conmutación es de 4980 Hz. Los lazos externos se encargan de entregar las referencias de corriente que deben seguir los lazos internos y se diseñan de tal manera que el ancho de banda de sus funciones de transferencia en lazo cerrado sea al menos una década inferior al ancho de banda de los lazos internos. Las funciones de transferencia para v_{cd} y las potencias activas y reactivas de cada VSC están dadas por:

$$\begin{aligned} \frac{v_{cd}(s)}{v_{cd}^*(s)} &= \frac{k_{pv} v_2^d s + k_{iv} v_2^d}{2C_{cd} v_{cd}^* s^2 + k_{pv} v_2^d s + k_{iv} v_2^d} \\ \frac{P_1(s)}{P_1^*(s)} &= \frac{k_{pp} v_1^d s + k_{ip} v_1^d}{(k_{pp} v_1^d + 2)s + k_{ip} v_1^d} \\ \frac{P_3(s)}{P_3^*(s)} &= \frac{k_{pp} v_3^d s + k_{ip} v_3^d}{(k_{pp} v_3^d + 2)s + k_{ip} v_3^d} \\ \frac{Q_1(s)}{Q_1^*(s)} &= \frac{k_{pq} v_1^d s + k_{iq} v_1^d}{(-k_{pq} v_1^d + 2)s - k_{iq} v_1^d} \\ \frac{Q_2(s)}{Q_2^*(s)} &= \frac{k_{pq} v_2^d s + k_{iq} v_2^d}{(-k_{pq} v_2^d + 2)s - k_{iq} v_2^d} \\ \frac{Q_3(s)}{Q_3^*(s)} &= \frac{k_{pq} v_3^d s + k_{iq} v_3^d}{(-k_{pq} v_3^d + 2)s - k_{iq} v_3^d} \end{aligned} \quad (17)$$

3.2 Dinámica cero

La estabilidad de los puntos de equilibrio de la dinámica cero está basada en el seguimiento de los lazos de corriente; por lo tanto, para lograr una respuesta satisfactoria, la velocidad de convergencia de los lazos de corriente debe ser mayor que en los lazos externos. A través del cambio de coordenadas $x = \phi^1(\xi, \eta)$, donde, $\xi = [x_1, \dots, x_2]^T$ representa la dinámica externa, $\eta = (L_1(\xi_1^2 + \xi_2^2) + 2C_{cd}x_3^2)/2C_{cd}$ representa la dinámica interna, y el vector de estados está dado por $x = [i_1^d \ i_1^q \ v_{cd}]^T$, el sistema se descompone en su dinámica interna y externa como se muestra en [Khalil, 1996]. Haciendo $\xi = 0$ la dinámica se convierte en:

$$\dot{\eta} = -\frac{2\eta}{r(t)C_{cd}} \quad (18)$$

donde $r(t)$ es variable en el tiempo. El sistema se dice que es de fase mínima, dado que es asintóticamente exponencialmente estable. Es decir, la tensión en el bus de CD se regula indirectamente al punto de operación $v_{cd} = V_{cd}^*$ cuando i_2^d tiende a i_2^{d*} .

4. RESULTADOS DE SIMULACION

La estrategia de control propuesta ha sido simulada utilizando Matlab/simulink-PSIM, utilizando los parámetros de las Tablas 1 y 2. El convertidor BTB de tres puertos monofásico está dimensionado para una potencia nominal de 10 kW por puerto. La primera simulación consiste en lo siguiente: transferir una potencia total de 10 kW de v_1 y v_3 hacia v_2 , de manera que VSC₁ y VSC₃ aportan 5 kW cada uno. En $t=0.5s$ se invierte el 100% de la potencia activa. También en $t=0.5s$ cada VSC compensa -5 kVAR. Los resultados de la fig. 4 muestran que las componentes de la corriente en dq presentan un buen seguimiento en esta estrategia de control. En la tensión de CD se presenta un sobretiro inferior del 16 % y un sobretiro superior máximo del 8 % respecto al valor nominal.

Se puede observar que el sistema es desacoplado para estos rangos de operación.

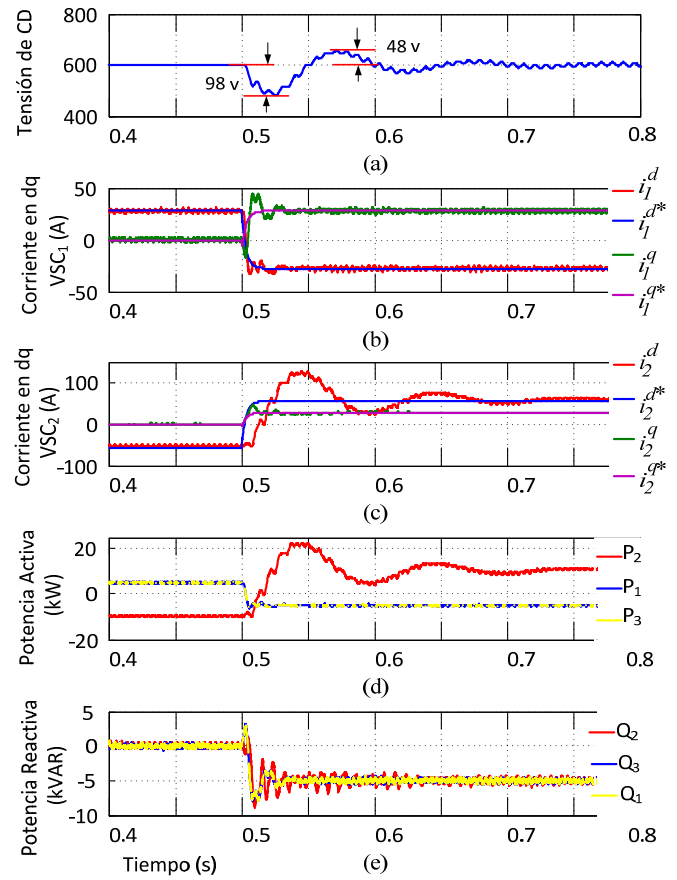


Fig. 4. Resultados de simulación para una inversión del 100 % en el flujo de potencia activa y compensación reactiva. (a) v_{cd} . (b) Seguimiento de corrientes de i_1^{dq} . (c) Seguimiento de corrientes de i_2^{dq} . (d) Potencia activa. (e) Potencia reactiva.

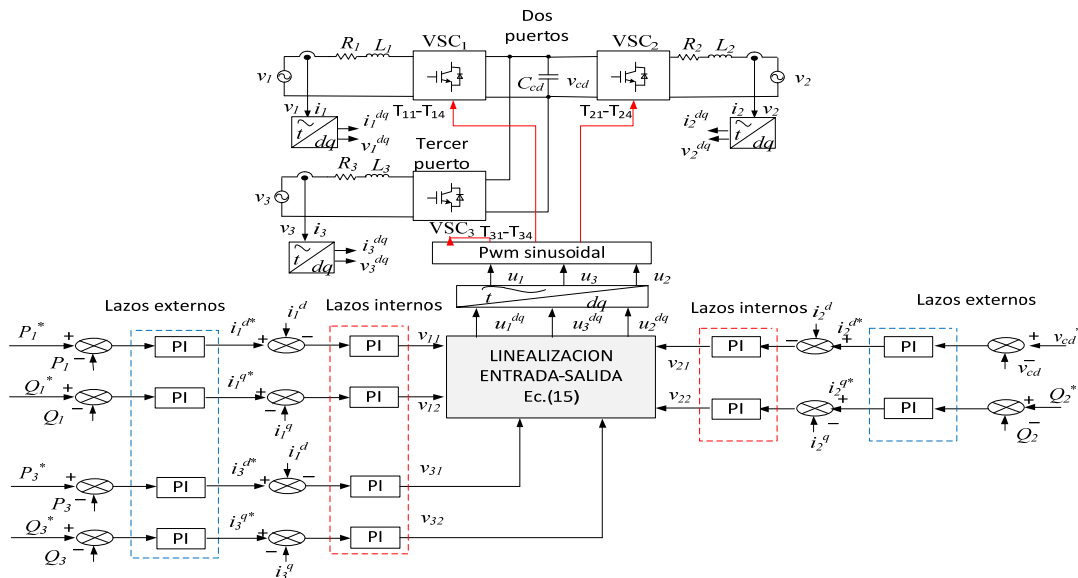


Fig. 3. Esquema de control para el convertidor BTB de tres puertos.

Tabla 2. Parámetros de controladores

Parámetro	Valor
k_{pv}	0.4
k_{iv}	50
k_{pp}	0.001
k_{ip}	2.01
k_{pa}	0.001
k_{ia}	-1.36

Para validar la región de operación mostrada en la sección 2, se considera la siguiente simulación. De la Fig. 2(a) se observa que la cota de la potencia activa es de 47.6 kW. Por lo tanto es posible aplicar una rampa de potencia al convertidor para verificar la estabilidad dentro de la región de operación. El objetivo de la simulación es sobrepasar las restricciones físicas de potencia del convertidor. La fig. 5 muestra la tensión en el bus de CD, la potencia activa y finalmente la señal de control. Se puede observar que cerca de $t=0.25s$ (cuando el convertidor supera los 47.6 kW) la señal de control se satura y consecuentemente, el sistema se hace inestable. De los resultados de simulación se puede concluir que la dinámica del control es adecuada, y si no es posible lograr los objetivos de control, se debe a las restricciones físicas del convertidor BTB de tres puertos. De esta manera la región de operación proporciona información que puede ser usada para evaluar el correcto funcionamiento del controlador y de la ley de control.

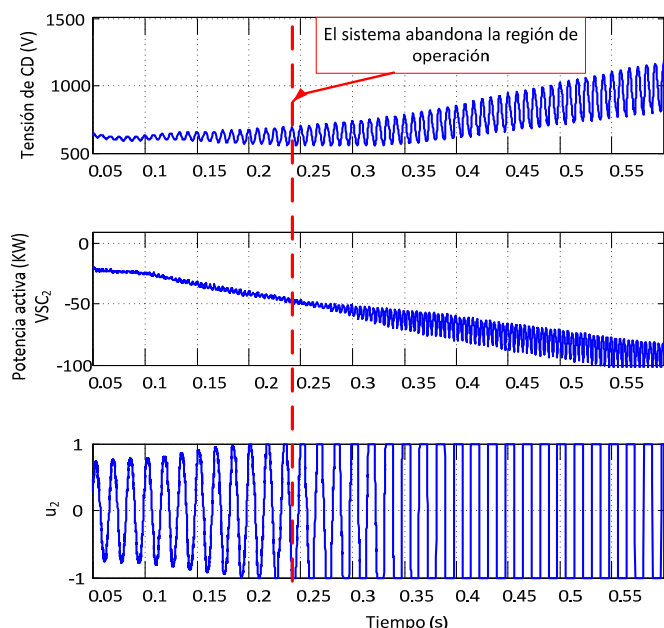


Fig. 5. Validación de región lineal de operación. (a) v_{cd} . (b) Potencia activa. (c) Señal de control u_2 .

5. CONCLUSIONES

En este trabajo se presentó el análisis de un convertidor BTB monofásico de tres puertos. El flujo de potencia activa se distribuye entre VSC₁ y VSC₃. VSC₂ se encarga de regular la tensión de CD. La estructura de control propuesta permite controlar de forma independiente el flujo bidireccional entre

los tres convertidores y logra una adecuada dinámica de las variables controladas. La simulación muestra que el convertidor BTB de tres puertos, a través de una estrategia de control conveniente, es un elemento adecuado para gestionar el flujo de potencia entre más de dos VSC.

6. AGRADECIMIENTOS

Los autores de este trabajo reconocen el apoyo del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología, CONACyT, a través de la beca para el desarrollo de los estudios de maestría del primer autor, y el financiamiento con el proyecto 215844.

REFERENCIAS

- Patidar, R.D. and Singh, S.P., "Active and Reactive Power Control and Quality Management in DG-Grid Interface Systems," *ARNP Journal of Engineering and Applied Sciences*, vol 4, pp.81-90, May 2009.
- Li, F., Zou, Y.P., Wang, C.Z., Chen, W., Zhang, Y.C. and Zhang, J., "Research on AC Electronic Load Based on back to back single-phase PWM Rectifiers," in *IEEE 2008 Applied Power Electronic Conference*, 2008. pp.360-634. 2008.
- Chen, R., Chen, Y. and Yang, Y., "Single-Stage Asymmetrical Half-Bridge Regulator With Ripple Reduction Technique," *Power Electronics, IEEE Transactions on*, vol.23, no.3, pp.1358-1369, May 2008.
- Mohan N, Tore M., William P., "Power Electronic Converters, Applications and Design," Third edition, On page(s): 200-248.
- Nasiri A. and Emadi A. "Different Topologies for Single-Phase Unified Power Quality Conditioners", *Industry Application Conference*, 2003. 38th. IAS Annual Meeting. Conference Record, vol.2, pp.976-981. 2003.
- 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.
- González, M., Cárdenas V. and Pazos F., "DQ Transformation Development for Single-Phase Systems to Compensate Harmonic Distortion and Reactive Power," *9th IEEE International Power Electronics Congress, CIEP 2004*, pp. 177-182.
- Espinoza J., Joós G., Pérez M. and Morán T. L., "Operating Region in Active-Front-End Voltage/Current Source Rectifiers," *IEEE Power Electronics Specialists Conference, PESC 2005*, vol.2, pp. 1726-1731. 2005.
- Khalil H., *Nonlinear Control*, New Jersey: Prentice Hall, Second Edition, 1996, Chapter 12.
- Alcala J., Cárdenas V., Rosas E. and Nuñez C., "Control system design for bi-directional power transfer in Single-Phase Back-to-Back converter based on the linear operating region," *Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC), 2010 Twenty-Fifth Annual IEEE*, vol.2, pp. 1651-1658. 2010.