

# Esquema de Control para un Sistema VSC–HVDC Monopolar con Convertidores Multinivel NPC

Jorge I. González, Homero Miranda, Víctor Cárdenas, Felipe Pazos.  
Centro de Investigación y Estudios de Posgrado, Facultad de Ingeniería,  
Universidad Autónoma de San Luis Potosí,  
{hmirandav, vcardena, fpazos}@uaslp.mx

**Resumen**—En este trabajo se presenta un esquema de control para un sistema de transmisión de alto voltaje en corriente directa (VSC–HVDC) con convertidores diodos de enclavamiento (NPC) de tres niveles en configuración back to back. Los objetivos de control son repartidos de tal forma que cada convertidor NPC tenga el control sobre la potencia reactiva y el desbalance presente en el bus de  $cd$  respectivo. El control del flujo de potencia activa está dedicado a un convertidor, mientras que la regulación de uno de los buses de  $cd$  lo efectúa el otro convertidor. El esquema de control se obtiene a partir del modelo en  $dq0$  y mediante simulaciones realizadas en el entorno de PSCAD/EMTDC se corrobora el desempeño del esquema de control.

**Palabras clave:** Sistemas de Transmisión, Convertidores fuentes voltaje, Potencia reactiva.

## I. INTRODUCCIÓN

Los sistemas de transmisión de alto voltaje en corriente directa con convertidores fuente de tensión (VSC–HVDC) se encuentran en constante crecimiento y comercialmente se han vuelto cada vez más competitivas. Los HVDC han experimentado cambios y desarrollos gracias a los avances tecnológicos en la electrónica de potencia (Flourentzou *et al.*, 2009). Esto ha dado lugar, a que las etapas de conversión en un sistema HVDC, sean convertidores con fuente de tensión (VSC) o fuente de corriente (CSC). Los convertidores multinivel son una solución eficiente como etapa de potencia en aplicaciones de media y alta tensión como variadores de velocidad y acondicionadores de red. Una campo en el que estos han sido propuestos es como unidades de conversión en sistemas VSC–HVDC (Flourentzou *et al.*, 2009), (Rodríguez *et al.*, 2009). En (Song *et al.*, 2013), presenta un esquema VSC–HVDC con múltiples convertidores modulares conectados en serie; el trabajo está dedicado al desarrollo de un modelo en el dominio de la frecuencia. En (Khatir *et al.*, 2010) se presenta un esquema de control en  $dq0$  para un sistema VSC–HVDC asíncrono, el punto neutro de los condensadores está conectado directamente a cada una de los neutros del sistema de  $ca$ , de manera que de forma natural la tensión en los condensadores está balanceada y el esquema de control sólo se dedica a regular la tensión en cada uno de los convertidores y al flujo de potencia activa y reactiva. En (Saedifard *et al.*, 2009) se muestra un esquema de modulación vectorial empleado para controlar el desbalance

de tensión en los condensadores de los convertidores multinivel con diodos de enclavamiento (NPC) de cinco niveles; el modelo obtenido está en el dominio de la frecuencia, lo cual lo vuelve muy extenso si se consideran todas las componentes asociadas a la técnica de modulación. Una variante de convertidores multinivel en cascada para aplicaciones en HVDC se presenta en (Liu *et al.*, 2008), el esquema de control es complejo, de manera que se recurre a modelados simples que reemplazan las etapas de conversión por fuentes ideales de  $ca$ .

En este trabajo se desarrolla un modelo matemático simple que exhibe un comportamiento similar a los que se proponen en la literatura, facilitando el análisis y el desarrollo de una ley de control. Se presenta la síntesis de una ley de control dedicada a un sistema VSC–HVDC con convertidores multinivel con diodos de enclavamiento (NPC). El esquema de control propuesto contempla el control del flujo bidireccional de potencia activa, control de potencia reactiva en ambos convertidores, la regulación de la tensión en ( $cd$ ) y el desbalance entre los puntos neutros de cada NPC. El trabajo está organizado como sigue: en la sección II se describen los fundamentos del esquema de potencia. En la sección III se obtiene el modelo en las coordenadas  $abc$  y posteriormente se mapea al marco de referencia síncrono  $dq0$ . El desarrollo del esquema de control se presenta en la sección IV. Los resultados de simulación obtenidos en el entorno PSCAD/EMTDC se muestran en la sección V y finalmente en VI las conclusiones del trabajo.

## II. SISTEMA HVDC BASADO EN VSC–NPC

Un sistema VSC–HVDC consiste en dos estaciones de conversión basadas en convertidores fuente de voltaje (VSC) operando a frecuencias de conmutación, superiores a la de la red eléctrica. La operación del convertidor VSC se controla fácilmente mediante técnicas de modulación PWM sinusoidal, dando al VSC la capacidad de manejar distintas frecuencias de conmutación. Además, a diferencia de los sistemas HVDC clásicos, en los sistemas VSC–HVDC las componentes armónicas de corriente asociadas a la frecuencia de conmutación pueden eliminarse, minimizando su efecto sobre las redes interconectadas. A través de reactores de potencia el convertidor se conecta a la red eléctrica. La figura 1 muestra el circuito de potencia de una red VSC–HVDC, en la que por medio de un cable

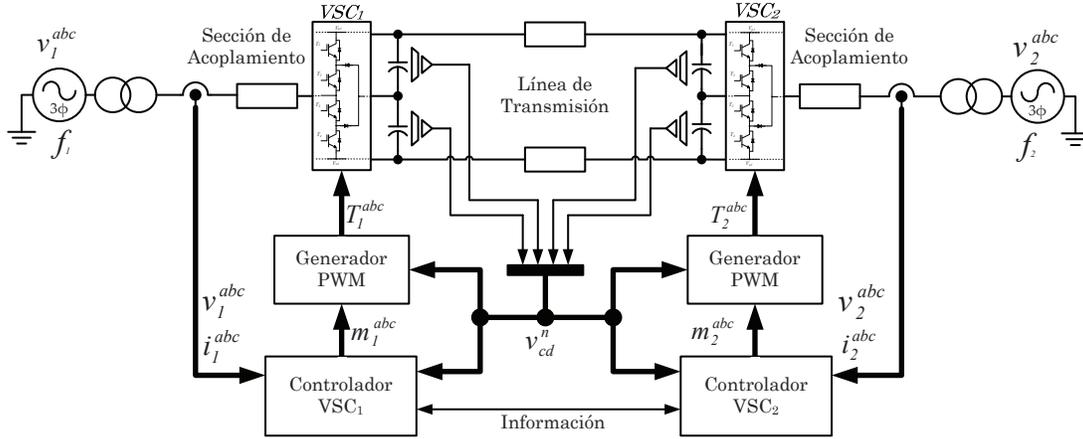


Figura 1. Sistema VSC-HVDC con convertidores multinivel NPC.

de longitud considerable en conjunto con los convertidores NPC interconecta a dos sistemas eléctricos de distintas características.

### III. MODELO MATEMÁTICO

El convertidor multinivel con diodos de enclavamiento (NPC) está compuesto por interruptores de potencia (IGBT, GTO o IGCT), diodos de enclavamiento y elementos pasivos (Miranda *et al.*, 2008). El modelo matemático debe incorporar a todas las variables de interés en el convertidor.

#### III-A. VSC-HVDC con convertidores multinivel NPC

Para el modelado del sistema se recurre al esquema de la figura 1. Esta figura ilustra de forma esquemática al sistema VSC-HVDC, en la que se puede observar que el sistema está compuesto de convertidores multinivel NPC, los cuales presentan características idénticas y están dotados de una etapa que acondiciona los niveles de tensión y corriente para cada una de las redes de  $ca$ . Ambos convertidores NPC están conectados entre sí a través de una línea de transmisión en  $cd$ , la cual, se aproxima como un cable de longitud considerable.

#### III-B. Modelo matemático en coordenadas $abc$

Para obtener el modelo matemático en coordenadas  $abc$  del sistema VSC-HVDC, es necesario asumir las consideraciones siguientes:

- Las tensiones y corrientes de  $ca$  están balanceados en fase y magnitud.
- La tensión en cada condensador se considera constante y balanceada.
- Los dispositivos semiconductores se modelan como interruptores ideales de tres posiciones.
- Las pérdidas en la línea de transmisión se representan mediante un arreglo de resistencias.

En base a las suposiciones mencionadas se genera el esquema de la figura 2, la cual presenta una parte del sistema VSC-HVDC simplificado.

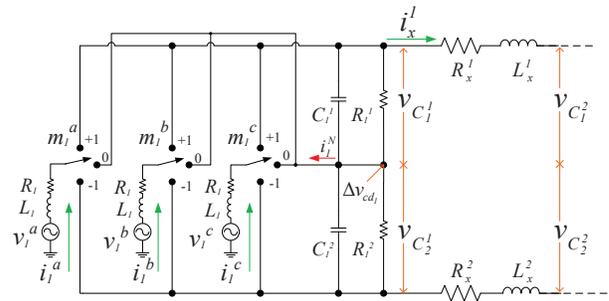


Figura 2. Esquema simplificado del sistema HVDC

De la figura 2, se define la tensión total en el bus de  $cd$  ( $V_{cdn}$ ) y al desbalance  $\Delta V_{cdn}$ , tal como (1a) y (1b), respectivamente.

$$V_{cdn} = V_{C_n^1} + V_{C_n^2}, \quad (1a)$$

$$\Delta V_{cdn} = V_{C_n^1} - V_{C_n^2}, \quad (1b)$$

donde  $n$  denota al convertidor NPC 1 ó 2.

Mediante el uso de las leyes de Kirchhoff se analiza la etapa de  $ca$  del convertidor; suponiendo que la tensión en cada uno de los condensadores está regulada y hay una ligera desviación entre ellas. Mediante LVK sobre la sección de alterna de la figura 2, se obtiene la ecuación de malla como sigue,

$$\frac{d\mathbf{i}_n^{abc}}{dt} = \frac{1}{L_n} \left[ -R_n \mathbf{i}_n^{abc} - \mathbf{m}_n^{abc} \frac{V_{cdn}}{2} + \Delta V_{cdn} + \mathbf{v}_n^{abc} \right], \quad (2)$$

donde:  $R_n$  y  $L_n$  son la resistencia y la inductancia de interconexión,  $\mathbf{v}_n^{abc}$  e  $\mathbf{i}_n^{abc}$  son las tensiones y corrientes de línea respectivamente, y  $\mathbf{m}_n^{abc} \in \{-1, 0, 1\}$  son las funciones de conmutación.

Para el análisis de la etapa del bus de  $cd$ , se emplea el esquema eléctrico mostrado en la figura 3.

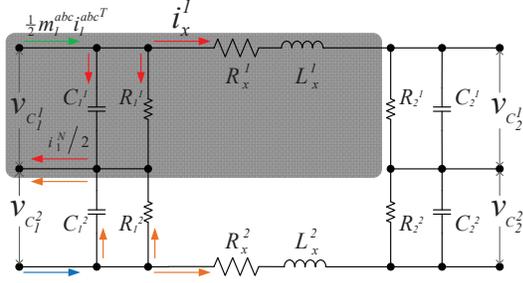


Figura 3. Etapa de  $cd$  del sistema de VSC-HVDC.

Aplicando  $LCK$  sobre la sección sombreada de la figura 3, se obtiene:

$$\frac{1}{2} \mathbf{m}_{n_1}^{abcT} \mathbf{i}_{n_1}^{abc} - C_{n_1}^1 \frac{dv_{C_{n_1}^1}}{dt} - \frac{v_{C_{n_1}^1}}{R_{n_1}^1} - \frac{v_{C_{n_1}^1}}{R_x^1} + \frac{v_{C_{n_2}^1}}{R_x^1} + \frac{i_1^N}{2} = 0, \quad (3a)$$

$$\frac{1}{2} \mathbf{m}_{n_1}^{abcT} \mathbf{i}_{n_1}^{abc} - C_{n_1}^2 \frac{dv_{C_{n_1}^2}}{dt} - \frac{v_{C_{n_1}^2}}{R_{n_1}^2} - \frac{v_{C_{n_1}^2}}{R_x^2} + \frac{v_{C_{n_2}^2}}{R_x^2} - \frac{i_1^N}{2} = 0, \quad (3b)$$

donde:  $C_n^g$  son los condensadores en el bus de  $cd$ ,  $R_n^g$  son las pérdidas en cada VSC,  $R_x^g$  es la impedancia de la línea de transmisión,  $v_{C_n^g}$  es la tensión en cada condensador,  $i_1^N$  es la corriente del punto neutro, e  $\mathbf{i}_{n_1}^{abc}$  son las corrientes de línea. Utilizando (1a) y (1b), y suponiendo que ambas secciones (superior e inferior) de la etapa de  $cd$  presentan características similares, se llega a (4).

$$\frac{dv_{cd_1}}{dt} = \frac{1}{C_1^1} \left[ -\frac{v_{cd_1}}{R_{eq_1^1}} + \frac{v_{cd_2}}{R_x^1} + \mathbf{m}_1^{abcT} \mathbf{i}_1^{abc} \right], \quad (4a)$$

$$\frac{d\Delta v_{cd_1}}{dt} = \frac{1}{C_1^1} \left[ -\frac{\Delta v_{cd_1}}{R_{eq_1^2}} + \frac{\Delta v_{cd_2}}{R_x^2} + i_1^N \right], \quad (4b)$$

donde:  $R_{eq_n^m} = \frac{R_n^m \cdot R_x^m}{R_n^m + R_x^m}$ .

### III-C. Modelo del sistema en el marco de referencia $dq0$

El marco de referencia  $dq0$  presenta la ventaja, sobre el sistema en coordenadas  $abc$ , de que simplifica la implementación del esquema de control y transforma los objetivos de control de un problema de seguimiento a un problema de regulación (Miranda *et al.*, 2008).

Mediante la transformación de *Park* se obtiene una representación del modelo en  $abc$  al marco de referencia  $dq0$ . Reescribiendo a (2) de la forma siguiente:

$$L_1 \frac{di_1^{dq0}}{dt} = -R_1 i_1^{dq0} - \mathbf{m}_1^{abc} \frac{V_{cd_1}}{2} + \Delta V_{cd_1} + \mathbf{v}_1^{dq0}, \quad (5)$$

y aplicando a (5) la matriz de transformación (Miranda *et al.*, 2008), se obtiene (6), la cual representa la dinámica de

las corrientes en el marco de referencia  $dq0$ .

$$L_1 \frac{di_1^{dq0}}{dt} = -R_1 i_1^{dq0} - \mathbf{m}_1^{dq0} \frac{V_{cd_1}}{2} - L_1 \omega \mathbf{T} \mathbf{i}_1^{dq0} + \mathbf{K} \frac{\Delta V_{cd_1}}{\sqrt{3}} + \mathbf{v}_1^{dq0} \quad (6)$$

donde  $\mathbf{T} = \begin{bmatrix} 0 & -1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$ ,  $\mathbf{K} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}$ , y  $\omega$  es la frecuencia angular de la red eléctrica.

Para transformar el conjunto de ecuaciones dado por (4), correspondientes a la dinámica del bus de  $cd$ , se aplica la matriz transformación de *Park* a (4a) y se obtiene:

$$\frac{dv_{cd_n}}{dt} = \frac{1}{C_n^1} \left[ -\frac{v_{cd_{n_1}}}{R_{eq_{n_1}^1}} + \frac{v_{cd_{n_2}}}{R_x^1} + \mathbf{m}_{n_1}^{dq0T} \mathbf{i}_{n_1}^{dq0} \right], \quad (7)$$

y para el desbalance, el mapeo de (4b) al marco  $dq0$  queda como:

$$\frac{d\Delta v_{cd_n}}{dt} = \frac{1}{C_{n_1}^2} \left[ -\frac{\Delta v_{cd_{n_1}}}{R_{eq_{n_1}^2}} + \frac{\Delta v_{cd_{n_2}}}{R_x^2} + \frac{i_{n_1}^0}{\sqrt{3}} \right]. \quad (8)$$

## IV. DISEÑO DEL ESQUEMA DE CONTROL

Los objetivos del esquema de control están seleccionados en base a las funciones que desempeña el sistema. Para el caso particular del sistema VSC-HVDC es la transferencia de energía a través de una línea de transmisión. Por lo tanto, los objetivos de control son:

1. Regular la tensión de  $cd$  en la línea de transmisión.
2. Permitir el flujo bidireccional de potencia activa.
3. Controlar la cantidad de potencia reactiva que el convertidor absorbe o entrega a la red eléctrica a la que está conectada.
4. Minimizar el desbalance de tensión entre los condensadores del bus en  $cd$  de cada VSC.

### IV-A. Distribución de los objetivos de control

La distribución se hace de forma indistinta, dado que ambos convertidores poseen las mismas características y capacidades de potencia. La regulación de tensión en el bus de  $cd$  se asigna al VSC<sub>1</sub>, esto permitirá mantener regulado el voltaje  $v_{cd_1}$ , mientras que el nivel de voltaje  $v_{cd_2}$  estará en función de la demanda y el sentido del flujo de potencia activa. El VSC<sub>2</sub> es el encargado de controlar el flujo bidireccional de potencia. El manejo de la potencia reactiva se realiza de forma independiente en cada VSC, dado que cada convertidor tiene la capacidad de controlar el flujo de potencia reactiva. El desbalance entre los condensadores del bus de  $cd$  en cada VSC deberá ser mínimo (aproximadamente cero); ya que un desbalance provocará la inyección de componentes armónicas a la red de  $ca$  respectiva. Por lo tanto este objetivo se asigna a cada uno de los VSC. La figura 1 muestra un esquema sintético del sistema VSC-HVDC con sus lazo de control.

#### IV-B. Esquema de control

Las leyes de control necesarias para cumplir con los objetivos operativos en el convertidor NPC se describen en esta sección. Dado el conocimiento *a priori* del sistema VSC–HVDC, es necesario proponer una relación diferencial lineal entre la salida real del sistema y una nueva entrada de control; dicha relación permite controlar al sistema no lineal por medio de técnicas lineales (Khalil, 2001).

##### Esquema de control para las corrientes $dq0$

Retomando a (6), la cual corresponde a la dinámica de las corrientes en función de las entradas  $\mathbf{m}_n^{dq0}$ ; es posible obtener una relación diferencial lineal entre la entrada de control y los estados  $d\mathbf{i}_n^{dq0}/dt$ . De lo que se propone que:

$$\mathbf{U}_n^{dq0} = \frac{d\mathbf{I}_n^{dq0}}{dt}. \quad (9)$$

Aplicando  $\mathcal{L}$  a (9) y despejando a  $\mathbf{i}_n^{dq0}$  se obtiene

$$\mathbf{I}_n^{dq0} = \frac{1}{s} \mathbf{U}_n^{dq0}. \quad (10)$$

La expresión (10) es la relación diferencial lineal para la cual se propone una nueva entrada de control que permite controlar el sistema de forma local; de tal forma que la trayectoria de la variable de estado sea asintóticamente estable. Proponiendo un compensador PI para (10) y desarrollando para obtener la función en lazo cerrado se obtiene,

$$\frac{\mathbf{I}_n^{dq0}}{\mathbf{I}_n^{dq0*}} = \frac{k_p^U s + k_i^U}{s^2 + k_p^U s + k_i^U}. \quad (11)$$

La  $\mathbf{U}$  de control capaz de regular el valor de las corrientes se emplea para obtener a  $\mathbf{m}_n^{dq0}$ . Retomando, una vez más, a (6) y aplicando el cambio de variable dado en (9) a (6) se obtiene:

$$L_n \mathbf{U}_n^{dq0} = -R_n \mathbf{i}_n^{dq0} - \mathbf{m}_n^{dq0} \frac{V_{cdn}}{2} - X_n \mathbf{T} \mathbf{i}_n^{dq0} + \mathbf{K} \frac{\Delta V_{cdn}}{\sqrt{3}} + \mathbf{v}_n^{dq0}, \quad (12)$$

donde  $X_n = L_n \omega$ , y  $\omega$  es la frecuencia de red.

Despejando la variable  $\mathbf{m}_n^{dq0}$  de (12), con el fin de obtener el valor de las funciones de conmutación dependientes del valor de la ley de control  $\mathbf{U}_n^{dq0}$ , tal como,

$$\mathbf{m}_n^{dq0} = \varrho \left( -L_n \mathbf{U}_n^{dq0} - R_n \mathbf{i}_n^{dq0} - X_n \mathbf{T} \mathbf{i}_n^{dq0} + \mathbf{K} \nu + \mathbf{v}_n^{dq0} \right), \quad (13)$$

donde:  $\varrho = \frac{2}{V_{cdn}}$ , y  $\nu = \frac{\Delta V_{cdn}}{\sqrt{3}}$ .

Para conocer a  $\mathbf{m}_n^{dq0}$  utilizando (13), es necesario obtener el valor de las corrientes de referencia que permita alcanzar los objetivos de control.

##### Esquema de control para el flujo de potencia

Para generar las corrientes de referencia y controlar tanto la potencia activa como la reactiva, se hace uso de (14a) y (14b).

$$P_n = \frac{3(V_n^d I_n^d + V_n^q I_n^q)}{2}, \quad (14a)$$

$$Q_n = \frac{3(V_n^q I_n^d - V_n^d I_n^q)}{2}. \quad (14b)$$

Es evidente que el valor de las corrientes  $\mathbf{I}_n^{dq}$  inciden directamente sobre la cantidad de potencia que cada uno de los convertidores necesita manejar. Asumiendo que los voltajes en *ca* se consideran balanceados en magnitud y fase, entonces las corrientes de referencia se obtienen como:

$$I_n^{*d} = \frac{2P_n^*}{3V_n^d} \quad (15a)$$

$$I_n^{*q} = \frac{-2Q_n^*}{3V_n^d} \quad (15b)$$

Mediante (15a) y (15b) se proponen los esquemas de control para la potencia activa del VSC<sub>1</sub> y para la potencia reactiva de ambos VSCs.

##### Esquema de control para la potencia activa

La ecuación (15a) establece la cantidad de corriente  $i_n^d$  que debe circular por el convertidor para transmitir una potencia determinada, mientras se mantiene en un valor constante el voltaje  $v_n^d$ . La figura 4 muestra el esquema de control para la potencia activa.

##### Esquema de control de control de potencia reactiva

Para el control del flujo de potencia reactiva se tiene un esquema similar, con la diferencia de que para generar la referencia de corriente se hace uso de (15b)

##### Esquema de control para la tensión del bus de *cd*

Para controlar la tensión en el bus de *cd* se parte de (7), donde se modela el comportamiento de la tensión en función de las variables de estado del sistema y de las señales de control tal como:

$$\frac{dv_{cd1}}{dt} = \frac{1}{C_1} \left[ -\frac{v_{cd1}}{R_{eq1}} + \frac{v_{cd2}}{R_x} + \mathbf{m}_1^{dq0 T} \mathbf{i}_1^{dq0} \right]. \quad (16)$$

Por lo tanto, se propone una nueva relación diferencial lineal de la siguiente manera:

$$\mathbf{W}_1 = \frac{dv_{cd1}}{dt}, \quad (17)$$

este sistema se controla de la misma manera que (10). De igual forma, se propone un compensador PI para garantizar la regulación del voltaje en *cd*. La función de transferencia en lazo cerrado está dada por:

$$\frac{v_{cd1}}{v_{cd1}^*} = \frac{k_p^W s + k_i^W}{s^2 + k_p^W s + k_i^W}. \quad (18)$$

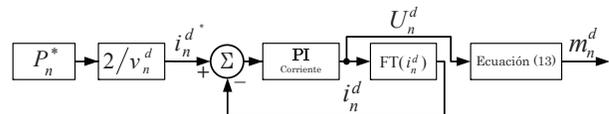


Figura 4. Lazo de control para la potencia activa.

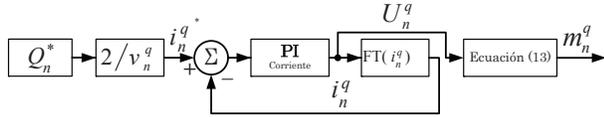


Figura 5. Lazo de control para la potencia reactiva.

Para la regulación de la tensión en el bus de  $cd$ , es necesario obtener la cantidad de corriente que el convertidor requiere para mantenerlo regulado. Partiendo de (16), y mediante un cambio de variable mostrado por (17) se llega a (19).

$$\mathbf{W}_1 = \frac{1}{C_1^1} \left[ -\frac{v_{cd1}}{R_{eq1}^1} + \frac{v_{cd2}}{R_x^1} + m_1^d i_1^d + m_1^q i_1^q + m_1^0 i_1^0 \right]. \quad (19)$$

Para obtener de (19) la corriente correspondiente al eje  $d$ , se propone lo siguiente:

- La tensión en  $ca$  está balanceada en magnitud y fase, por lo tanto  $v_n^q$  es cero.
- Las corrientes en  $dq0$  están en su valor deseado, de manera que las entradas de control se aproximan a cero.

Sustituyendo el valor de las entradas de control, obtenidas en (13), dentro de (19) y multiplicando por  $V_{cd1}$  ambos lados, y finalmente reduciendo los términos semejantes se llega a:

$$a i_1^{d2} + b i_1^d + c = 0 \quad (20)$$

donde:  $a = -2R_1$ ,  $b = 2v_1^d$ , y  $c = -2R_1 (i_1^{q2} + i_1^{02}) + \frac{2}{\sqrt{3}} \Delta v_{cd1} i_1^0 - \frac{v_{cd1}^2}{R_{eq1}^1} + \frac{v_{cd1} v_{cd2}}{R_x^1} - C_1^1 v_{cd1} \mathbf{W}_1$ .

Para obtener la corriente de referencia  $i_1^d$  de (20) es necesario resolver la ecuación. En la figura 6 se muestra el diagrama a bloques del lazo de control propuesto para regular la tensión en el bus de  $cd$ .

*Esquema de control para el desbalance en el bus de  $cd$*

El desarrollo del lazo de control asociado al desbalance presente en la tensión de los condensadores en cada VSC, se parte de (8), la cual representa el comportamiento del desbalance en función de la corriente de secuencia cero. Asumiendo que el desbalance del VSC<sub>2</sub> está controlado y tiene un valor constante y cercano a cero, lo cual permite despreciar su efecto dentro de (8). Aplicando  $\mathcal{L}$  y despejando el valor de  $\Delta v_{cdn}$ , se obtiene,

$$\Delta v_{cdn} = i_n^0 \left( \frac{1/\sqrt{3}}{C_n^m s + R_{eq_n}^{m-1}} \right). \quad (21)$$

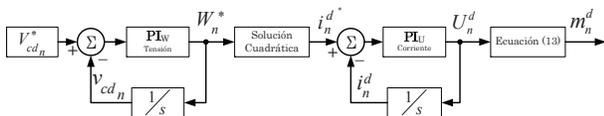


Figura 6. Esquema de control para el bus de  $cd$ .

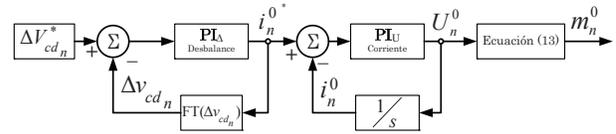


Figura 7. Lazo de control para minimizar el desbalance.

La expresión (21) es la función de transferencia del desbalance y tiene como entrada la corriente  $i_n^0$ . Aplicando, nuevamente, un compensador PI para mitigar el desbalance, se obtiene la función de transferencia en lazo cerrado como:

$$\frac{\Delta v_{cd1}}{\Delta v_{cd1}^*} = \frac{\frac{k_p \Delta s + k_i \Delta}{\sqrt{3} C_n^m}}{s^2 + \frac{R_{eq_n}^{-1} + k_p \Delta}{\sqrt{3} C_n^m} s + \frac{k_i \Delta}{\sqrt{3} C_n^m}}. \quad (22)$$

Se propone el esquema de la figura 7 para generar la ( $i_n^{0*}$ ). Ésta se emplea para obtener la señal de control  $U_n^0$  y posteriormente  $m_n^0$ .

## V. RESULTADOS DE SIMULACIÓN

Para corroborar el desempeño del esquema de control se presentan resultados de simulación obtenidos en PSCAD/EMTDC. La tabla I muestra los parámetros de sistema VSC–HVDC, en la tabla II se muestran los valores de las constantes de los compensadores de cada esquema de control y por último, la tabla III contiene los niveles de potencia de cada uno de los convertidores.

En la figura 8, parte superior, se observa la transferencia de potencia activa, en donde el valor nominal de potencia se alcanza en 200 ms; el VSC<sub>1</sub> transfiere únicamente 76 MW, esto se debe a las pérdidas en los semiconductores y las resistencias asociadas a la sección de acoplamiento y a la línea de transmisión. En un tiempo igual a 1.5s se aplica una demanda del 100% pero en sentido contrario, dicha demanda se alcanza en 250 ms. El convertidor número uno presenta un sobretiro del 5%. En 255 ms el sistema regresa

TABLA I

PARÁMETROS DEL SISTEMA DE TRANSMISIÓN VSC–HVDC.

Sección de acoplamiento			Línea de transmisión		
Parámetro	Valor	Unidades	Parámetro	Valor	Unidades
$V_{1,2}^{abc}$	122.5	kV <sub>L-lrms</sub>	$V_{cd}$	350	kV
$R_n^{abc}$	0.75	$\Omega$	$R_x^m$	0.0139	$\Omega/\text{km}$
$L_n^{abc}$	20	mH	$L_x^m$	159	$\mu\text{H}/\text{km}$
$f_1$	60	Hz	Distancia	500	km
$f_2$	50	Hz	$C_n^m$	$1000 \times 10^{-6}$	F
$m_f$	19	—	$R_n^m$	$1.0 \times 10^8$	$\Omega$

TABLA II

PARÁMETROS DE LOS COMPENSADORES PI.

Compensador	$k_p$	$k_i$
$U^{dq}$	$2.52 \times 10^3$	$3.36 \times 10^5$
$U^0$	$5.040 \times 10^2$	$6.720 \times 10^4$
$W$	$2.466 \times 10^2$	$3.523 \times 10^3$
$Desbalance$	$3.233 \times 10^{-4}$	$1.096 \times 10^{-3}$
$K_{erc}$	250	

TABLA III  
POTENCIAS NOMINALES PARA EL VSC–HVDC

Potencias nominales del sistema				
Convertidor	$P_{m\acute{a}x}$	$P_{m\acute{i}n}$	$Q_{m\acute{a}x}$	$Q_{m\acute{i}n}$
VSC <sub>1</sub>	80MW	-80MW	40MVAR	-40MVAR
VSC <sub>2</sub>	80MW	-80MW	40MVAR	-40MVAR

a la condición inicial con una sobre demanda de apenas el 1 %.

En la parte inferior de la figura 8 se muestra el desempeño de la tensión en la línea de transmisión. Al igual que en las pruebas anteriores, el sistema experimenta una demanda bidireccional del 100 % de la potencia nominal del convertidor. El lazo de tensión permite que la tensión en  $cd$  del VSC<sub>1</sub> esté regulado en 200 kV con un tiempo de estabilización de aproximadamente 250 ms y sobretiros del 5.5 %. La tensión del VSC<sub>2</sub> se regula dependiendo de la cantidad de potencia que el convertidor transmite; por tal motivo la tensión de este convertidor toma valores de 4.9 kV por arriba o 5.3 kV por debajo de la tensión del primer convertidor.

Las formas de onda de la tensión y corriente de cada punto de conexión, se ilustran en la figura 9. Donde se puede observar que ambos sistemas poseen frecuencias de línea distintas (sistema asíncrono), además, se aprecia que el VSC<sub>1</sub> tarda tres ciclos de red en estabilizarse y presenta un sobre tiro en la corriente de 300 A; mientras que el VSC<sub>2</sub> lleva a cabo la inversión de forma casi instantánea.

## VI. CONCLUSIONES

En este artículo se desarrolló un modelo matemático de un sistema VSC–HVDC monopolar basado en convertidores multinivel con diodos de enclavamiento (NPC). El esquema de control propuesto, a diferencia de los que se encuentran en la literatura, contempla los problemas asociados al desbalance que se presenta en el bus de  $cd$  de los convertidores NPC. El esquema de control muestra un buen desempeño, manteniendo los niveles de tensión en  $cd$  y potencia activa

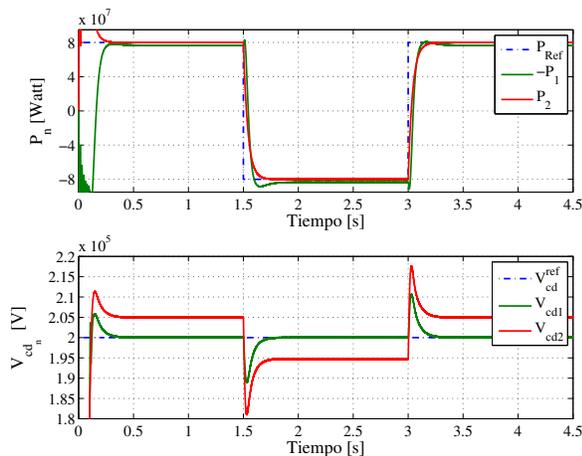
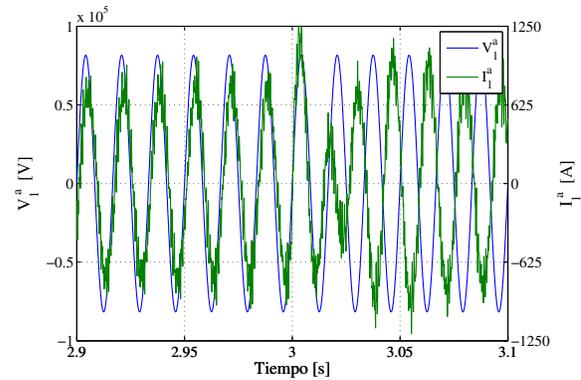


Figura 8. Potencia activa y tensión en el bus de  $cd$ .

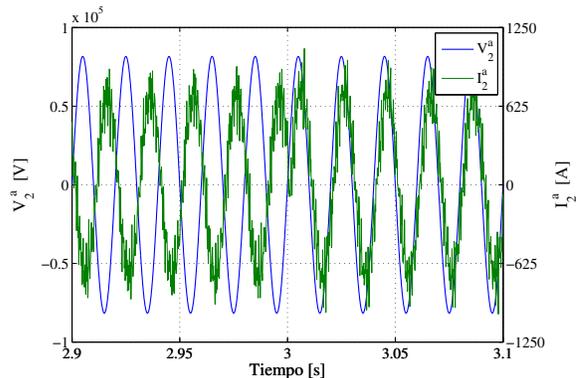
y reactiva en sus valores deseados, tal como se demostró en los resultados de simulación.

## REFERENCIAS

- Flourentzou, N., V.G. Agelidis y G.D. Demetriades (2009). Vsc-based hvdc power transmission systems: An overview. *IEEE Transactions on Power Electronics* **24**, 592–602.
- Khalil, Hassan K. (2001). *Nonlinear Control Systems*. third ed. Prentice Hall. New York.
- Khatir, Mohamed, Sid-Ahmed Zidi, Samir Hadjeri y Mohammed-Karim Fellah (2010). Dynamic performance of a back-to-back hvdc station based on voltage source converters. *Journal of ELECTRICAL ENGINEERING* **61**, 29–36.
- Liu, Y.H., J. Arrillaga y N.R. Watson (2008). Cascaded h-bridge voltage reinjection–part i a new concept in multilevel voltage–source conversion. *IEEE Transactions on Power Delivery* **23**, 1175–1182.
- Miranda, H., V. Cardenas, N. Visairo, G. Sandoval y G. Espinosa-Perez (2008). A dq0 passivity-based approach for 3 $\phi$  four–wire shunt active power filter based on npc three–level converter. *34th Annual Conference of IEEE Industrial Electronics* **1**, 3171–3177.
- Rodriguez, J., L.G. Franquelo, S. Kouro, Portillo R.C. Leon, J.I., M.A.M. Prats y M.A. Perez (2009). Multilevel converters: An enabling technology for high-power applications. *Proceedings of the IEEE* **97**, 1786–1817.
- Saeedifard, M., Iravani R. y J. Pou (2009). A space vector modulation strategy for a back-to-back five-level hvdc converter system. *IEEE Transactions on Industrial Electronics* **56**, 452–466.
- Song, Qiang, Wenhua Liu, Xiaoqian Li, Hong Rao, Shukai Xu y Licheng Li (2013). A steady-state analysis method for a modular multilevel converter. *IEEE Transactions on Power Electronics* **28**, 3702–3713.



(a) VSC<sub>1</sub>.



(b) VSC<sub>2</sub>.

Figura 9. Tensión y corriente en  $ca$  ante una demanda de potencia.