

## **Análisis del comportamiento de las variables de estado del vsc-hvdc con un esquema ptp cuando transfiere potencia activa entre sistemas de potencia asíncronos**

José García, Francisco Ortega y María González

J. García, F. Ortega y M. González  
Instituto Tecnológico Superior de Irapuato, Carretera Irapuato-Silao, km. 12.5, C. P. 36821, Irapuato, Gto.  
migarcia@itesi.edu.mx

M. Ramos.,V.Aguilera.,(eds.). Ciencias de la Ingeniería y Tecnología, Handbook -©ECORFAN- Valle de Santiago, Guanajuato, 2014.

## Abstract

In this research work is proposed an optimization model based on the formulation Optimal Power Flow (OPF), through which it is carried out an analysis of the behavior of the state variables of the Voltage Source Converted-High Voltage Direct Current(VSC-HVDC) when it is used to transfer active power between two electric power systems asynchronous. The model of VSC-HVDC device considering a Point-to-Point (PtP) scheme is implemented in an OPF formulation with active power transfer through the VSC-HVDC link as objective function. The analysis of the state variables of the controller is done using two case studies considering the IEEE two-area benchmark power system. In each study case it is considered a different resistance of the DC link and the maximum active power transferred between power systems is computed, in order to establish the operating range of the device in which the behavior of the state variables of the VSC-HVDC is studied.

## 15 Introducción

Los sistemas de transmisión están bajo continuos cambios, principalmente aquellos asociados con la transferencia de potencia entre SEPs, con lo cual se ha dado lugar a una apertura del mercado para suministrar energía más económica a los consumidores, mientras se satisfacen restricciones económicas y ecológicas, las cuales retrasan la construcción de nueva infraestructura de transmisión. Debido a que la construcción de las líneas de transmisión no puede ir a la par con el incremento de la capacidad de generación y demanda, los operadores de los sistemas de potencia están buscando distintas formas para utilizar la infraestructura de transmisión de la manera más eficiente, operando la red de formas que originalmente no se tenían previstas (Pizano et al, 2007). La necesidad de operar los sistemas eléctricos de potencia en forma más eficiente y el rápido desarrollo de la electrónica de potencia, basada en nuevos dispositivos semiconductores, han dado lugar a nuevas tecnologías, tales como los controladores FACTS basados en Fuentes de Voltaje Conmutadas (VSC, por sus siglas en inglés) (Hingorani & Gyugyi, 2000).

Entre los controladores basados en VSC comisionados e instalados en diversos sistemas de transmisión alrededor del mundo, los Enlaces de Corriente Directa en Alta Tensión Basados en Fuentes de Voltaje Conmutadas (VSC-HVDC, por sus siglas en inglés), también llamado HVDC-Light® o HVDC-Plus®, es una tecnología reciente que ha demostrado ser exitosa en la mejora de la controlabilidad de los sistemas de potencia (Asplund, 2001). En contraste al HVDC tradicional, el VSC-HVDC puede controlar, además del flujo de potencia activa, la magnitud de voltaje en forma independiente en cada nodo del sistema de CA en el que se conecta y el flujo de potencia reactiva, siempre y cuando no se controle la magnitud de voltaje en el nodo donde se controla dicha potencia.

El primer proyecto de instalación de la tecnología HVDC tuvo lugar entre Suecia y la isla de Gotland, el cual comenzó su operación en Noviembre de 1999. A este proyecto le han seguido otros que utilizan la tecnología VSC-HVDC alrededor del mundo, entre los cuales se encuentran los desarrollados en Australia, Estados Unidos y Noruega (Asplund, 2001).

Actualmente se han publicado algunos artículos de investigación donde se abordan aspectos clave sobre la operación y características de la tecnología VSC-HVDC, tales como (Bahrman et al, 2003) y (ABB, 2005), mientras que en otros estudios (Ángeles et al, 2003; Zhang, 2004) se trata el modelado matemático adecuado para el análisis en estado estacionario de sistemas de potencia a gran escala. Los estudios de FPO están siendo más y más utilizados por los ingenieros de la industria .

Desde el punto de vista de planeación de sistemas de potencia, el FPO puede ser utilizado para determinar características óptimas, tamaños, tipos, costo y ubicación óptimas de equipos, tales como generadores, líneas de transmisión y controladores.

Desde un punto de vista de operación y control del sistema de potencia, una solución de FPO proporciona una respuesta de como los controles disponibles deberían ajustarse para satisfacer la demanda de energía de la manera más económica mientras se satisfacen las restricciones de operación impuestas por el sistema (Pizano et al, 2007). Por lo tanto, la incorporación del modelo del VSC-HVDC en una formulación de FPO brinda una oportunidad de explotar completamente las capacidades del dispositivo en todas aquellas aplicaciones de optimización relacionadas con dicho controlador.

Es importante mencionar que en muchas de las publicaciones asociadas con la tecnología VSC-HVDC y con la formulación de FPO, los investigadores han utilizado distintos lenguajes de programación que permiten implementar los modelos matemáticos, lo cual puede resultar complejo. En otras publicaciones con el fin de resolver el modelo de FPO y a su vez agilizar la investigación en el área de optimización, los investigadores han puesto atención en los paquetes comerciales de optimización comerciales, tales como AMPL (KNITRO, 2014) y GAMS (Drud, 1996). Por ejemplo, AMPL y GAMS han sido empleados para: resolver un modelo de FPO con restricciones complementarias (Rosehart et al, 2005), identificar y analizar bifurcaciones en sistemas de potencia (Ávalos, 2009), resolver modelos de FPO con restricciones de estabilidad transitoria (Zarate et al, 2010) y más recientemente para resolver un modelo de FPO que considera restricciones de estabilidad de voltaje para seguridad de sistemas de potencia (Gutiérrez,2010) y para encontrar la ubicación óptima de controladores FACTS para la planeación óptima de la operación de sistemas de potencia (Lashkar, 2012), entre otras aplicaciones.

Otra herramienta computacional que permite la solución del problema de FPO con relativa facilidad y que no ha sido muy utilizada es la herramienta de optimización de Matlab (MathWorks, 2014). Este software fue utilizada por Pizano et al.(2010) para implementar y resolver un modelo de FPO convencional, posteriormente García et al.(2013) adoptó esta propuesta para desarrollar un modelo en el que se implementó y resolvió el problema de FPO con el modelo del VSC-HVDC. En este artículo se propone un modelo de optimización que permite llevar a cabo el análisis de las variables de estado del VSC-HVDC cuando se conecta en el sistema para transferir potencia entre enlaces débiles o entre sistemas de potencia asíncronos.

Además, se utiliza la función `fmincon` de Matlab como una aplicación innovadora de dicha función de optimización en la solución de modelo propuesto en este trabajo, con el fin de mostrar la capacidades y ventajas que tiene, ya que Matlab es un software ampliamente utilizado por estudiantes e investigadores de las distintas áreas de la ingeniería.

## **15.1 Materiales y métodos**

### **Modelado del Sistema Eléctrico de Potencia y del VSC-HVDC**

#### **A. Modelado del Sistema Eléctrico de Potencia**

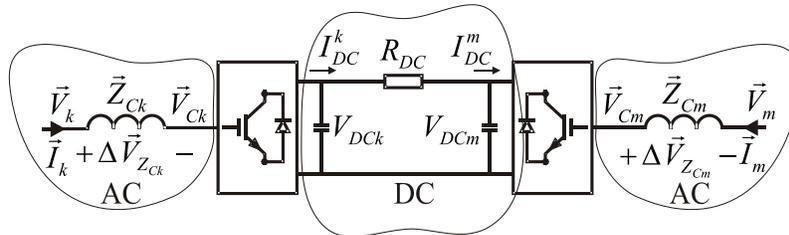
Los generadores, cargas, elementos de compensación en paralelo, líneas de transmisión y transformadores son considerados los principales elementos del Sistema Eléctrico de Potencia (SEP).

Los modelos de flujo de potencia de estado estacionario de los componentes antes mencionados son dados a detalle en (Acha et al, 2004).

## B. Modelado del VSC-HVDC

La tecnología VSC-HVDC consiste de dos convertidores controlados por Modulación de Ancho de Pulso (PWM, por sus siglas en inglés), los cuales, de acuerdo a su aplicación, pueden ser conectados en esquemas Back-to-Back (BtB) en la misma subestación o a través de un enlace de Corriente Directa (CD) en un esquema Point-to-Point (PtP), tal como se muestra en la Figura 1 (ABB, 2005).

**Figura 15** Enlace de transmisión VSC-HVDC

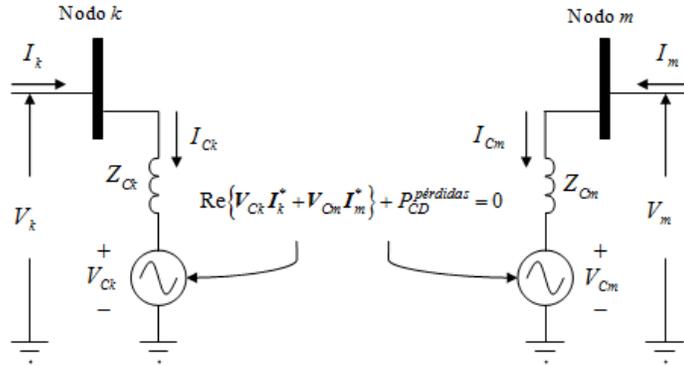


El control PWM hace posible tener un ajuste simultáneo de la amplitud y del ángulo de fase del voltaje de salida en el convertidor de Corriente Alterna (CA) con un voltaje de corriente directa constante. Este control permite representar el voltaje de salida de ambos convertidores del VSC-HVDC en el lado  $i$  ( $i=k,m$ ) por una fuente de voltaje conmutada  $V_{Ci} = V_{Ci} \angle \theta_{Ci}$ , con límites de amplitud y ángulo de fase  $V_{Ci}^{\min} \leq V_{Ci} \leq V_{Ci}^{\max}$  and  $0 \leq \theta_{Ci} \leq 2\pi$ , respectivamente. Por lo tanto, el VSC-HVDC puede ser representado por un modelo basado en fuentes de voltaje conmutadas, mostrado en la Figura 2, en el que están conectados dos sistemas eléctricos de potencia síncronos o asíncronos; el SEP que envía la potencia se conecta en el nodo  $k$  y el SEP receptor en el nodo  $m$ . La impedancia del transformador de acoplamiento es dada por  $\bar{Z}_{Ci}$  (Pizano et al, 2007). Basado en el circuito equivalente mostrado en la Figura 2, los flujos de potencia del nodo  $i$  al nodo  $j$  ( $i=k,m; j=k,m; i \neq j$ ) son (Pizano et al, 2007),

$$P_{ij}^{inj} = V_i^2 G_{Ci} - V_i V_{Ci} [G_{Ci} \cos(\theta_i - \theta_{Ci}) + B_{Ci} \sin(\theta_i - \theta_{Ci})] \quad (15)$$

$$Q_{ij}^{inj} = -V_i^2 B_{Ci} - V_i V_{Ci} [G_{Ci} \sin(\theta_i - \theta_{Ci}) - B_{Ci} \cos(\theta_i - \theta_{Ci})] \quad (15.1)$$

donde  $G_{Ci} + jB_{Ci} = 1/\bar{Z}_{Ci}$ . Las ecuaciones de flujos de potencia en el convertidor conectado al nodo  $i=k,m$ , se obtienen intercambiando los subíndices  $i$  por  $Ci$  y viceversa en todas las variables de las ecuaciones, excepto en la conductancia y la susceptancia.

**Figura 15.1** Circuito equivalente del VSC-HVDC

La magnitud del voltaje en el lado de CA del convertidor conectado en el nodo  $i$ ,  $V_{Ci}$ , es relacionado con la amplitud del índice de modulación del control PWM y con el promedio del voltaje del capacitor en el lado de CD,  $V_{CDi}$ , por la siguiente expresión (Acha et al, 2004),

$$V_{Ci} = M_{Ci} V_{DCi} / 2\sqrt{2} \quad M_{Ci} \in [0,1] \quad (15.2)$$

Las restricciones operacionales consideradas en el modelo del controlador VSC-HVDC son:  $V_{Ci}^{\min} \leq V_{Ci} \leq V_{Ci}^{\max}$ ,  $M_{Ci}^{\min} \leq M_{Ci} \leq M_{Ci}^{\max}$  and  $V_{DCi}^{\min} \leq V_{DCi} \leq V_{DCi}^{\max}$ . Debe ser notado que la última restricción solo se aplica cuando el voltaje  $V_{DCi}$  no es controlado en un valor específico. La ecuación de restricción relacionada con el intercambio de potencia activa entre los convertidores para un esquema BtB ( $R_{DC} = 0$ ) es dada por  $\text{Re}\{V_{Ck} I_{Ck}^* + V_{Cm} I_{Cm}^*\} = 0$ ; mientras que para un esquema PtP con una resistencia diferente de cero ( $R_{DC} > 0$ ) en el conductor del enlace de CD es dada por  $\text{Re}\{V_{Ck} I_{Ck}^* + V_{Cm} I_{Cm}^*\} + P_{CD} = 0$ .

Los modos de control PQ y PV son definidos en el VSC-HVDC en (Pizano et al, 2007), sin embargo, en este trabajo solamente se utiliza el control de magnitud de voltaje en el nodo  $i$  del sistema eléctrico receptor, el cual corresponde al lado inversor del controlador, para calcular la máxima transferencia la potencia activa a través del enlace y con ello establecer el rango de operación del VSC-HVDC. Además, se controla el flujo de potencia activa para obtener los datos del comportamiento de las variables de estado del dispositivo en el rango establecido. De esta manera, las ecuaciones que deben satisfacerse para tales casos son,

$$V_i - V_i^{esp} = 0 \quad (15.3)$$

$$P_{ij}^{inj} - P_{ij}^{esp} = 0$$

En ambos casos, el convertidor  $i$  controla el voltaje en el lado de CD en un valor  $V_{CDi}^{spec}$ . Por lo tanto, las pérdidas de potencia activa en el enlace de CD son  $P_{CD} = (P_{Ci}^2 R_{CD}) / (V_{CDi}^{spec})^2$ .

### Modelo de Optimización para la Determinación de la Máxima Transferencia de Potencia Activa a través del VSC-HVDC

### - Función objetivo

La función objetivo  $f(y)$  para el modelo de optimización propuesto representa la transferencia de potencia activa a través del dispositivo VSC-HVDC, la cual corresponde al flujo de potencia activa en el convertidor conectado en el nodo  $i$  ( $i=k,m$ ) y representado por el subíndice  $C_i$ .

$$f(y) = V_{C_i}^2 G_{C_i} - V_{C_i} V_i [G_{C_i} \cos(\theta_{C_i} - \theta_i) + B_{C_i} \sin(\theta_{C_i} - \theta_i)] \quad (15.4)$$

Es importante mencionar que esta función objetivo se implementa en forma negativa para poder maximizar su valor. Lo anterior es debido a que el algoritmo fuente de la función de optimización `fmincon` siempre minimiza la función objetivo.

### - Restricciones de igualdad

Para representar el estado de operación de estado estacionario, el balance energético del SEP debe satisfacerse incondicionalmente. Esto es logrado por medio del conjunto de restricciones de balance de potencia activa y reactiva en cada bus del sistema como sigue,

$$h(y) = \left\{ \begin{array}{l} P_{g_i} - P_{l_i} - \sum_{j \in i} P_{i n y j} - \sum_{j \in i} P_{j\_i n y V S C - H V D C} = 0, \\ Q_{g_k} - Q_{l_k} - \sum_{j \in k} Q_{i n y j} - \sum_{j \in k} Q_{j\_i n y V S C - H V D C} = 0 \end{array} \right. \quad \begin{array}{l} i=1,2,\dots,N_b \\ k=1,2,\dots,N_b | k \notin N_g \end{array} \quad (15.5)$$

donde  $N_b$  es el número total de buses del SEP. La potencia activa y reactiva del generador  $j$  ( $j=i,k$ ) son  $P_{g_j}$  y  $Q_{g_j}$ , respectivamente. Las demandas de potencia activa y reactiva son representadas en forma respectiva por  $P_{l_j}$  y  $Q_{l_j}$ .  $\sum_{j \in i,k}$  es el conjunto de nodos adyacentes al nodo  $j$ , mientras que  $P_{i n y j}$  y  $Q_{i n y j}$  son la potencia activa y reactiva inyectadas en el bus  $i$  y  $k$  a través del  $j$ -ésimo elemento del SEP. La inyección de flujo de potencia activa y reactiva del controlador son, respectivamente,  $P_{i n j j V S C - H V D C}$  y  $Q_{i n j j V S C - H V D C}$ . Las restricciones de igualdad asociadas a la operación del VSC-HVDC son incluidas mediante las siguientes ecuaciones,

$$h_1(y) = \left\{ \begin{array}{l} \sum_{i=k,m} (V_{C_i} - M_{C_i} V_{C D i} / 2\sqrt{2}) = 0 \\ \sum_{i=k,m} (V_{C D i} - V_{C D i}^{e s p}) = 0 \\ P_{C_k} + P_{C_m} + P_{C D} = 0 \end{array} \right. \quad (15.6)$$

La primera ecuación está relacionada con (3), la segunda es el control de  $V_{C D i}$ , mientras que la tercera ecuación corresponde a las restricciones de potencia activa del VSC-HVDC para un esquema de conexión PtP.

Como se mencionó antes, el rango de operación del controlador se establece una vez que se calcula la máxima transferencia de potencia activa. Para ello es necesario controlar la magnitud del voltaje en el nodo  $i$  ( $i=k,m$ ) del SEP receptor, lo cual se efectúa mediante la primera restricción de igualdad del conjunto de restricciones representado por la Ecuación (9).

El control de flujo de potencia activa a través del VSC-HVDC se lleva a cabo mediante la segunda restricción de dicha ecuación. Esta restricción se activa después de que se ha determinado la potencia activa máxima.

$$h_2(y) = \left\{ \begin{array}{l} V_i - V_i^{esp} = 0 \\ P_{ij}^{inj} - P_{ij}^{esp} = 0 \end{array} \right\} \quad (15.7)$$

El nodo  $i$  en el que se controla la magnitud de voltaje corresponde al nodo del sistema eléctrico receptor, por lo tanto, con la restricción de igualdad (9) es posible establecer la dirección de flujo de potencia activa entre los dos sistemas de potencia conectados a través del VSC-HVDC. Las Ecuaciones (7)-(9) forman el conjunto de restricciones de igualdad del modelo de optimización propuesto.

### - Restricciones de desigualdad

Los límites físicos y operacionales de los generadores y subestaciones son matemáticamente descritos por los siguientes conjuntos de restricciones de desigualdad,

$$Y = \left\{ \begin{array}{l} \underline{P}_{gi} \leq P_{gi} \leq \bar{P}_{gi}, \quad i=1,2,\dots,N_g \\ \underline{V}_j \leq V_j \leq \bar{V}_j, \quad j=1,2,\dots,N_b \end{array} \right\}$$

$$g(y) = \left\{ \underline{Q}_{gi} \leq Q_{gi} \leq \bar{Q}_{gi}, \quad i=1,2,\dots,N_g \right\} \quad (15.8)$$

Debe mencionarse que la generación de potencia activa  $P_{gi}$  y los límites de magnitud de voltaje  $V_j$  son simplemente restricciones de desigualdad a variables, mientras que los límites de generación de potencia reactiva son modelados como un conjunto de restricciones de desigualdad funcional, ya que dependen de  $V_j$ . En el modelo de optimización desarrollado para este trabajo, los límites de las variables de estado del controlador VSC-HVDC son incluidos como restricciones de desigualdad como sigue,

$$Y_1 = \left\{ \begin{array}{l} V_{Ci}^{\min} \leq V_{Ci} \leq V_{Ci}^{\max} \\ \theta_{Ci}^{\min} \leq \theta_{Ci} \leq \theta_{Ci}^{\max} \\ M_{Ci}^{\min} \leq M_{Ci} \leq M_{Ci}^{\max} \\ V_{DCi}^{\min} \leq V_{DCi} \leq V_{DCi}^{\max} \end{array} \right\} \quad (15.9)$$

Se debe notar que el conjunto completo de restricciones de desigualdad es formado por las Ecuaciones (10)-(12).

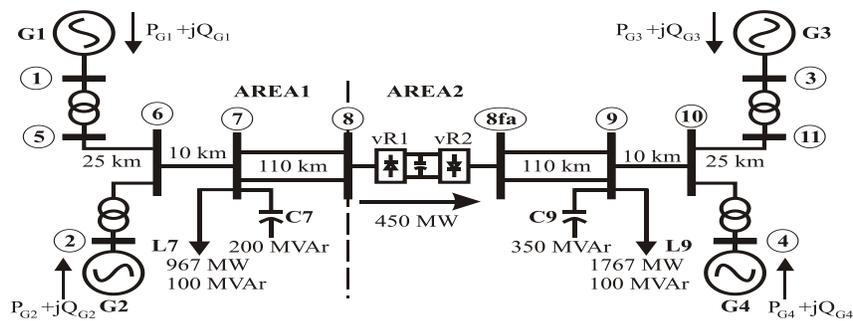
## 15.2 Resultados y discusión

El modelo propuesto es utilizado en un caso de estudio para determinar la máxima transferencia de potencia activa entre las dos áreas del sistema eléctrico de potencia de 11 nodos-dos áreas del IEEE, mostrado en la Figura 3, a través del dispositivo VSC-HVDC. El sistema está constituido de dos áreas idénticas (Área 1 y Área 2) conectadas a través de una línea de transmisión de doble circuito.

Los parámetros y las características de este sistema eléctrico de potencia son dados con detalle en (Xu et al, 1998). Sin el VSC-HVDC conectado al sistema, se transfieren 320.84 MW de potencia activa del Área 1 al Área 2. La red ha sido modificada para incluir el controlador en un esquema PtP para determinar la máxima potencia activa que puede transferirse del Área 1 al Área 2 a través del VSC-HVDC.

Los límites de las magnitudes de los voltajes nodales del sistema de potencia se han fijado en  $0.95 \leq V_i \leq 1.05$  pu. Las impedancias de los transformadores de acoplamiento son  $Z_{C8} = Z_{C8-fa} = 0.001 + j0.01$  pu. Los límites máximo y mínimo asociados con la magnitud de voltaje de las fuentes son 0.97 y 1.04 pu, respectivamente. Los límites de amplitud del índice de modulación y su condición inicial son  $0.5 \leq M_{ci} \leq 1.0$  y 0.9, en forma respectiva, mientras que el voltaje en el lado de CD del convertidor se penaliza en 3.0 pu. El VSC-HVDC solo controla la magnitud de voltaje en 1 pu en el nodo en el que se encuentra conectada la fuente en el lado inversor y no efectúa ninguna otra acción de control. La tolerancia de convergencia considerada en los casos de estudio es de  $1 \times 10^{-9}$ . Es importante mencionar que el tiempo de cómputo empleado para la determinación de la máxima transferencia de potencia activa entre las dos áreas del sistema eléctrico a través del VSC-HVDC varía para cada caso.

**Figura 15.2** Sistema eléctrico de potencia de 11 nodos y dos áreas



En los casos de estudio se consideran dos valores de la resistencia del enlace de CD del dispositivo sobre una base común de 100 MVA, esto con la finalidad de visualizar como es la afeción de tal resistencia en el valor de la máxima transferencia de potencia activa y por tanto en las variables de estado del VSC-HVDC en un esquema PtP. En la Tabla 1 se muestra la máxima potencia activa transferida y las variables de estado con tres valores de la resistencia del enlace. Los datos de la Tabla 1 muestran que con el aumento de la resistencia en el enlace de CD del VSC-HVDC disminuye la transferencia de potencia activa máxima en el dispositivo, lo cual es debido a la existencia de pérdidas en el conductor del enlace. Se debe mencionar que el análisis de las variables de estado del controlador se realiza solo con los valores de 0.001 pu y 0.00334 pu de la  $R_{CD}$  porque en este trabajo se está enfocando a una conexión PtP.

**Tabla 15** Máxima transferencia de potencia activa a través del VSC-HVDC con la variación de la  $R_{CD}$

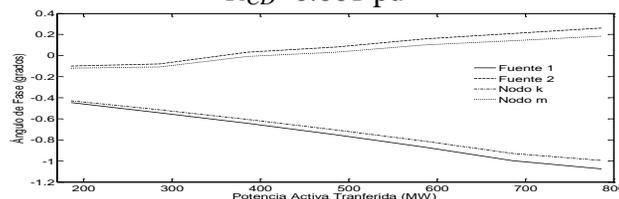
| Potencia máxima transferida y variables de estado | Resistencia del enlace de CD<br>$R_{CD}$ (pu) |         |          |
|---|---|---------|----------|
|   | 0   | 0.001   | 0.00334  |
| Potencia máxima transferida (MW)                  | 786.7784                                      | 786.087 | 784.4907 |
| Voltaje inicial de la fuente 1 (pu)               | 1.040   | 1.040   | 1.040    |
| Voltaje inicial de la fuente 2 (pu)               | 1.0158  | 1.0162  | 1.0161   |
| Ángulo inicial de la fuente 1 (grados)            | -1.0759                                       | -1.0759 | -1.0759  |
| Ángulo inicial de la fuente 2 (grados)            | 0.3374  | 0.2731  | 0.2781   |
| Índice de Modulación inicial de la fuente 1       | 0.9805  | 0.9805  | 0.9805   |
| Índice de Modulación inicial de la fuente 2       | 0.9577  | 0.9581  | 0.9580   |
| Ángulo en nodo k (grados)                         | -0.9957                                       | -0.9957 | -0.9957  |
| Ángulo en nodo m (grados)                         | 0.2603  | 0.1962  | 0.2014   |

En los casos de estudio se consideraron siete valores distintos de potencia activa transferida, con un determinado valor de resistencia del enlace de CD, para analizar el comportamiento de las variables de estado y conocer cómo es su comportamiento en función de la potencia activa que se transfiere a través del enlace. Para una mejor apreciación del comportamiento de cada una de las variables de estado del dispositivo en función de la potencia activa transferida, estos resultados se muestran gráficamente.

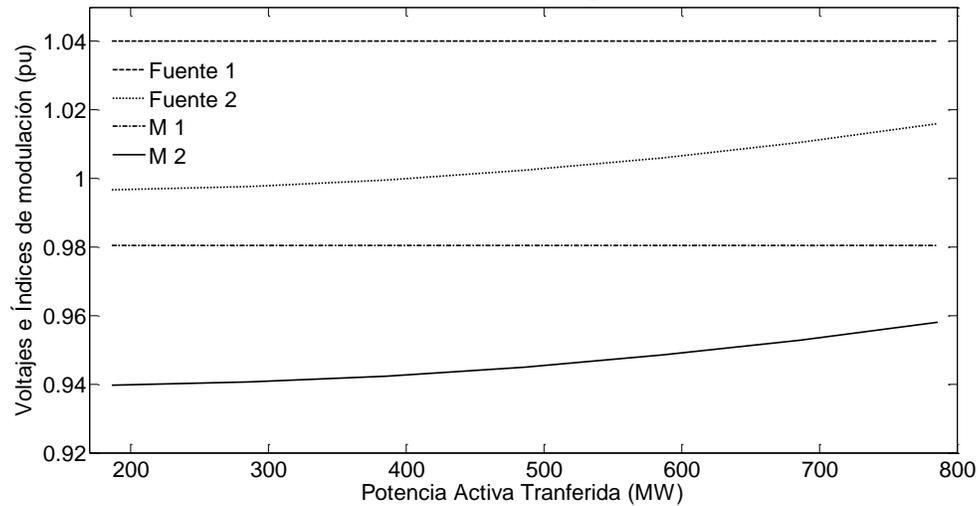
La Figura 15.3 muestra los ángulos de fase de las fuentes del VSC-HVDC y de los nodos en los cuales se encuentra conectado el controlador en función de la potencia activa transferida con una  $R_{CD}=0.001$  pu. La potencia activa transferida máxima se calculó en 786.09 MW. De acuerdo al análisis de flujos de potencia, la dirección de flujo de la potencia activa transferida se toma en relación a la diferencia entre los ángulos de las fuentes interconectadas. En la figura se observa el sentido de flujo de la potencia transferida por medio de las fuentes interconectadas, ya que los ángulos de fase de los voltajes de las fuentes proporcionan la dirección de flujo de la potencia activa. Si la diferencia entre los ángulos es negativa, el flujo de potencia va de la fuente 1 a la fuente 2, si la diferencia es positiva, el flujo de potencia va de la fuente 2 a la fuente 1. Lo anterior es contrario al análisis de flujos de potencia, ya que para este análisis se consideró una función objetivo negativa debido a que se está maximizando la misma. En la Figura 5 se muestran los resultados de la variación de los índices de modulación y las magnitudes de voltaje de las fuentes conmutadas del VSC-HVDC en función de la potencia transferida. En este caso, los índices de modulación tienen una relación directa con los voltajes, puesto que si el índice se ve afectado de manera creciente, el voltaje tendrá la misma afectación.

La figura muestra que al aumentar la potencia activa transferida aumenta el índice de modulación y la magnitud de voltaje de la fuente 2, mientras en la fuente 1 estos valores se mantienen constantes.

**Figura 15.3** Ángulos de fase de las fuentes y nodos en función de la transferencia de potencia con una  $R_{CD}=0.001$  pu

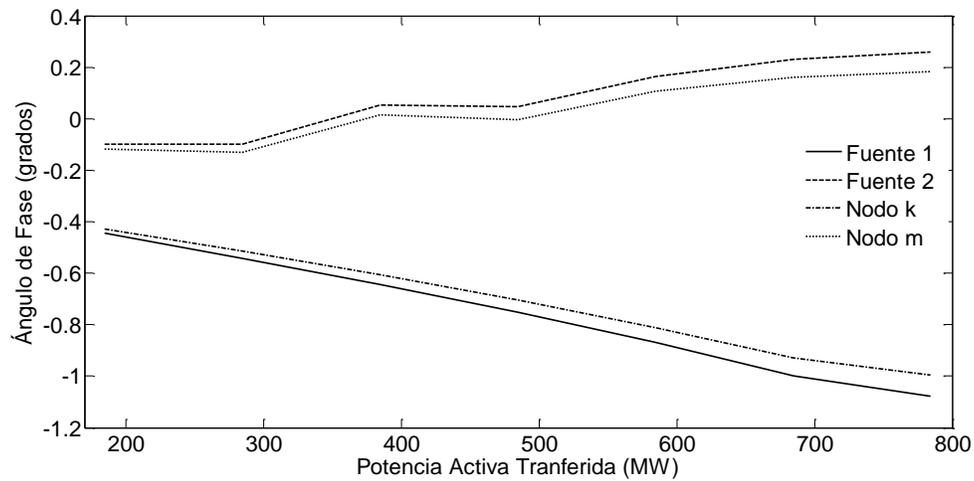


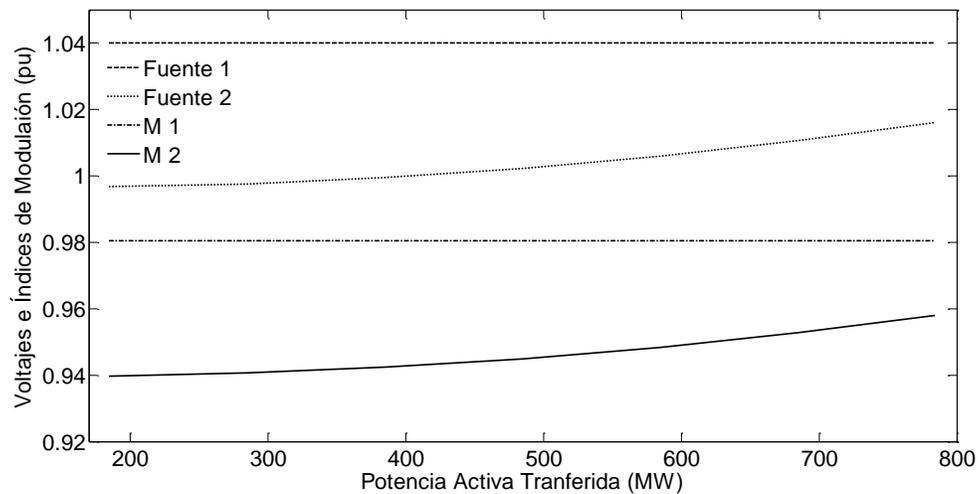
**Figura 15.4** Voltajes e índices de modulación en función de la potencia activa transferida con una  $R_{CD}$  de 0.001 pu



Las Figuras 15.3 y 15.4 muestran el comportamiento de los ángulos, voltajes e índices de modulación en función de la potencia activa transferida, tomando una resistencia  $R_{CD} = 0.00334$  pu. En este caso, la magnitud de voltaje de la fuente 2 es menor que la magnitud de la misma fuente considerando una  $R_{CD} = 0.001$  pu. De manera similar la diferencia de los ángulos de fase de las fuentes conmutadas es mayor cuando se considera una  $R_{CD} = 0.001$  pu, lo cual es debido a que con una menor resistencia se transfiere mayor potencia activa, tal como se ilustró en la Tabla 15.

**Figura 15.3** Ángulos de fase de las fuentes y nodos en función de la transferencia de potencia activa



**Figura 15.4** Voltajes e índices de modulación en función de la potencia activa transferida

### 15.3 Conclusiones

En este trabajo se presentó un modelo de optimización para la determinación de la máxima transferencia de potencia activa entre dos Sistemas Eléctricos de Potencia asíncronos a través del dispositivo VSC-HVDC.

El modelo por medio del cual se determina la transferencia de potencia es basado en la formulación de FPO, considerando como función objetivo a la máxima transferencia de potencia a través de dicho dispositivo.

El modelo propuesto fue probado mediante diversos casos de estudio considerando el sistema de prueba del IEEE de 11 nodos y dos áreas, en los que se consideraron dos valores de la resistencia del enlace de CD en un esquema PtP del VSC-HVDC.

Los casos de estudio mostraron que el valor de la resistencia del enlace de CD tiene efecto en el valor de las variables de estado del controlador, excepto en el índice de modulación y en la magnitud del voltaje de la fuente conmutada en el lado rectificador, los cuales no cambian su valor numérico al cambiar la resistencia del enlace de CD porque el VSC-HVDC controla la magnitud de voltaje a un valor especificado en el nodo en el que se conecta la fuente conmutada que opera como inversor. Los casos de estudio también mostraron que la diferencia entre los ángulos de fase de las fuentes conmutadas y de los nodos donde se conectan dichas fuentes es mayor conforme se aumenta la potencia activa transferida, además, con el aumento de esta potencia también se incrementa la magnitud de voltaje y el índice de modulación de la fuente en el lado inversor del controlador.

Por último, se demostró que cuando la resistencia del enlace de CD se incrementa, la máxima potencia activa transferida a través del VSC-HVDC disminuye y viceversa, lo cual es debido a la existencia de pérdidas en el conductor de CD en un esquema PtP del controlador, por tanto en un esquema BtB se transferirá la mayor potencia activa a través del enlace, puesto que no existen pérdidas a través de este.

## 15.4 Referencias

- ABB Power Systems AB. *Technical Description of HVDC Light® Technology Technical Report, 2005*. Zürich: Suiza, Recuperado de <http://www.abb.com>
- Acha, E., Fuerte, C. R., Ambriz, H., & Ángeles, C. (2004). *FACTS; Modelling and Simultaion in Power Networks*. Glaswov: John Wiley & Sons.
- Ángeles, C., Tortelli, O. L., Acha, E. & Fuerte, C. R. (2003). Inclusion of a high voltage DC-voltage source converter model in a Newton-Raphson power flow algorithm. *IEE Proc.-Gener.Transm. Distrib*, 150(6), 691–696.
- Asplund, G. (2001). Application of HVDC Light to power system enhancement. *Proceedings 2001 IEEE-PES Winter Meeting*, 4, 2498-2503.
- Avalos, R. J. , Canizares, C. A., Milano, F. & Conejo, A. J. (2009). Equivalency of Continuation and Optimization Methods to Determine Saddle-Node and Limit-Induced Bifurcations in Power Systems. *IEEE Transactions on Circuits and Systems*, 56(1), 210-223.
- Bahrman, M. P., Johansson, J. G. & Nilsson, B. (2003). Voltage source converter transmission technologies-the right fit for the application. *Proceedings 2003 IEEE-PES General Meeting*, 3, 1840–1847.
- Drud, A. S. *GAMS/CONOPT (1996)*, Bagsvaerd: Denmark. ARKI Consulting and Development. Recuperado de <http://www.gams.com/>.
- García, J.M., Ortega, F.J. & González, M. R. (2013). Integration of the VSC-based HVDC model into an OPF Matlab-based analysis. *Electrical Engineering Electronic Journal*, 2(2).
- Gutierrez, V.J., Canizares, C. A., Fuerte, C. R., Pizano, A. & Gu, X. (2010). Neural-network security-boundary constrained optimal power flow. *Transactions on Power Systems*, 26(1), 63-72.
- Hingorani, N.G. & Gyugyi, L. (2000). *Understanding FACTS: Concepts and Technology of Flexible AC Transmission Systems*. New York: IEEE Press.
- KNITRO. (2014). En *Composants Numériques de Artelys Tools*. Recuperado de [http://www.artelys.com/index.php?page=knitro&hl=en\\_EN](http://www.artelys.com/index.php?page=knitro&hl=en_EN)
- Lashkar, A., Kazemi, A. & Nabavi, S. A. (2012). Multiobjective Optimal Location of FACTS Shunt-Series Controllers for Power System Operation Planning. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 27(2), 481- 490.
- Momoh, J. A. , Koessler, R. J., Bond, M. S., Stott, B., Sun, D., Papalexopoulos, A. & Ristanovic, P. (1997). Challenges to optimal power flow. *IEEE Transactions on Power Systems*, 12(1), 444–455.
- Pizano, A., Fuerte, C. R., Ambriz, H. & Acha, E. (2007). Modelling of VSC-Based HVDC Systems for a Newton-Raphson OPF Algorithm. *IEEE Transactions on Power Systems*, 22(4), 1794-1803.

Pizano, A., Fuerte, C., Zamora, E.A., & Segundo, J. (2010) Conventional Optimal Power Flow Analysis Using the Matlab Optimization Toolbox, *Proceedings de la ROPEC International*.

Rosehart, W., Roman, C. & Schellenberg, A. (2005). Optimal Power Flow with Complementary Constraints. *IEEE Transactions on Power Systems*, 20 (2), 813-822,

The MathWorks, Inc. *Matlab Optimization Toolbox User's Guide Version 2, 2001*. Natick, MA: USA. Recuperado de <http://www.mathworks.com>.

Xu, X., Mathur, R.M., Jiang, J., Rogers, G.J. & Kundur, P. (1998). Modeling of generators and their controls in power system simulations using singular perturbations. *IEEE Transactions on Power Systems*, 13(1), 109-114.

Zarate, R., Van Cutsem, T., Milano, F. & Conejo, A. J. (2010). Securing transient stability using time-domain simulations within an optimal power flow. *IEEE Transactions on Power Systems*, 25(1), 243-253.

Zhang, X. P. (2004). Multiterminal voltage-sourced converter-based HVDC models for power flow analysis. *IEEE Transaction on Power Systems*, 19(4), 1877–1884.