

Determinación de puntos de equilibrio de sistemas de potencia considerando enlaces asíncronos mediante una formulación de Flujos de Potencia Óptimos

GARCIA-GUZMAN-José†*, ORTEGA-HERRERA, Francisco, TORRES-JIMENEZ, Jacinto y TAPIA-TINOCO, Guillermo

Instituto Tecnológico Superior de Irapuato. Carretera Irapuato-Silao, km. 12.5, C.P. 36821, Irapuato, Gto.

Recibido Julio 2, 2015; Aceptado Septiembre 29, 2015

Resumen

En este artículo se presenta una implementación práctica del modelo de enlaces asíncronos de Corriente Directa en Alta Tensión basados en Fuentes de Voltaje Conmutadas (VSC-HVDC por sus siglas en inglés) en una formulación de Flujos de Potencia Óptimos (OPF por sus siglas en inglés), con la finalidad de determinar puntos de equilibrio de sistemas eléctricos de potencia considerando enlaces asíncronos; dichos puntos de equilibrio corresponden a puntos óptimos de operación de estado estacionario del sistema de potencia. La implementación práctica del modelo del controlador VSC-HVDC en la formulación de OPF se realiza mediante la función de optimización no lineal restringida *fmincon* de Matlab®. En el punto óptimo se determinan los voltajes fasoriales en cada nodo del sistema, la generación de potencia activa y las variables de estado del controlador. Diversos casos de estudio se llevan a cabo cuando el VSC-HVDC es integrado al Sistema de Potencia Interconectado Mexicano (MIS por sus siglas en inglés) con el fin de determinar puntos óptimos de operación de estado estacionario que permitan visualizar las capacidades de control del dispositivo en las interconexiones asíncronas.

Puntos óptimos de equilibrio, enlaces asíncronos, VSC-HVDC, OPF

Abstract

This paper presents a practical implementation of asynchronous links model based on Voltage Source Converter-High Voltage Direct Current (VSC-HVDC) into an Optimal Power Flow (OPF) formulation, in order to determine clearing points of electric power systems when the most recent technologies of asynchronous links are integrated, these clearing points correspond to the optimal points of steady state of the power system. The practical implementation of the model of VSC-HVDC controller into the OPF formulation is performed by using the nonlinear constrained optimization function *fmincon* of the Matlab® software. At the optimal point, the voltage phases and magnitudes in each node of power system are determined, as well as the active power at generation buses and the state variables of the controller. Several study cases are carried out when the VSC-HVDC device is embedded to the Mexican Interconnected Power System, in order to determine the operation optimal points of steady-state to analyze the control capabilities of the device in asynchronous interconnections.

Optimal clearing points, asynchronous links, VSC-HVDC, OPF

Citación: GARCIA-GUZMAN-José, ORTEGA-HERRERA, Francisco, TORRES-JIMENEZ, Jacinto y TAPIA-TINOCO, Guillermo. Determinación de puntos de equilibrio de sistemas de potencia considerando enlaces asíncronos mediante una formulación de Flujos de Potencia Óptimos. Revista de Aplicación Científica y Técnica 2015, 1-2: 73-82

* Correspondencia al Autor (Correo Electrónico: migarcia@itesi.edu.mx)

† Investigador contribuyendo como primer autor.

Introducción

El crecimiento de la población impacta directamente en el incremento de la demanda de energía eléctrica y este a su vez en el crecimiento de los sistemas de potencia, lo que puede dar lugar a regiones del sistema eléctrico con diferentes frecuencias, las cuales pueden ser interconectadas por medio de enlaces asíncronos. Las tecnologías más recientes de enlaces asíncronos son las basadas en el Transformador de Frecuencia Variable (VFT por sus siglas en inglés) y los Enlaces de Corriente Directa en Alta Tensión basados en Fuentes de Voltaje Conmutadas. La tecnología del VFT es basada en máquinas rotativas y es capaz de controlar el flujo de potencia activa a través de los enlaces que interconectan sistemas eléctricos operando en diferentes niveles de frecuencia (Contreras, 2011). Esta tecnología se ha utilizado en diversos proyectos para interconectar redes eléctricas entre dos países (Hassink *et al*, 2007; Nabb *et al*, 2005). La tecnología de enlaces asíncronos basados en el VSC-HVDC es una tecnología reciente que ha demostrado ser exitosa en los proyectos de interconexión de sistemas o regiones eléctricas, ya sean síncronas o asíncronas, mejorando la controlabilidad de los sistemas de potencia (Asplund, 2001). El dispositivo VSC-HVDC tiene capacidad para proveer un control independiente de las magnitudes y ángulos de fase de los voltajes en los nodos donde se conecta, por lo que es posible utilizar lazos de control de potencia activa y reactiva en forma independiente para la regulación y control del sistema de potencia (Pizano *et al*, 2007).

La primera instalación de la tecnología HVDC comenzó su operación en el norte de Europa en 1999, este proyecto consistió en conectar Suecia con la isla de Gotland. Después de esta instalación, muchos han sido los proyectos eléctricos donde se ha utilizado la tecnología VSC-HVDC (Asplund, 2001).

La habilidad del VSC-HVDC para proveer un control independiente de las magnitudes de voltaje y ángulos de fase relativos a los voltajes del sistema, permite utilizar lazos de control de potencia activa y reactiva en forma separada para la regulación del sistema (Pizano *et al*, 2007). Desde un punto de vista de operación y control del sistema de potencia, la incorporación del modelo VSC-HVDC en una formulación de Flujos de Potencia Óptimos ofrece la posibilidad de explotar completamente las capacidades del controlador en cualquier aplicación relacionada con la optimización de sistemas de potencia (ABB, 2005). Es importante mencionar que en muchas de las publicaciones asociadas con la tecnología VSC-HVDC y con la formulación de OPF, los investigadores han utilizado distintos lenguajes de programación que permiten implementar los modelos matemáticos, lo cual puede resultar complejo. En este sentido, resulta de gran utilidad el uso de paquetes especializados de optimización o lenguajes de alto nivel, tal como Matlab® (Mathworks, 2015).

El modelo matemático del VSC-HVDC se ha ido modificando y recientemente se le han incluido restricciones que permiten modelar los límites de potencia aparente del dispositivo (Pizano *et al*, 2012), también se han reportado estudios de diseño de control óptimo del VSC-HVDC (Ayari *et al*, 2013), se ha utilizado el dispositivo para la interconexión de parques de aerogeneración (Belenguer, 2013) y se ha intentado mejorar la estabilidad del sistema de potencia mediante la integración de controladores HVDC multinivel en las redes de CA (Dorn *et al*, 2013). Sin embargo, son pocos los estudios que se han realizado considerando su aplicación como un enlace asíncrono para transferir potencia activa y reactiva entre dos redes o regiones de distinta frecuencia.

Por lo anterior, resulta indispensable implementar los modelos de los enlaces asíncronos basados en el VSC-HVDC en una formulación de Flujos de Potencia Óptimos para determinar puntos óptimos de operación de estado estacionario de sistemas eléctricos de potencia que permitan visualizar las capacidades de control del dispositivo en las interconexiones asíncronas.

Formulación general de Flujos de Potencia Óptimos

La formulación de Flujos de Potencia Óptimos es considerada como un problema de programación no lineal, donde el objetivo es minimizar una función de costo sujeta a un conjunto finito de restricciones de igualdad y desigualdad. La formulación general de FPO es dada por (Pizano *et al*, 2010),

$$\begin{aligned} & \text{Minimizar } f(\mathbf{y}) \\ & \text{Sujeto a } \mathbf{h}(\mathbf{y}) = 0 \\ & \text{y a } \mathbf{g}(\mathbf{y}) \leq 0 \\ & \mathbf{y}_{\min} \leq \mathbf{y} \leq \mathbf{y}_{\max} \end{aligned} \quad (1)$$

donde $f(\mathbf{y})$ es la función objetivo real a minimizar evaluada en $\mathbb{R}^n (f: \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^1)$; $\mathbf{h}(\mathbf{y})$ es un conjunto de r funciones reales evaluadas en $\mathbb{R}^n (h: \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^r)$, que corresponden a las restricciones de igualdad y representan las ecuaciones de balance de potencia activa y reactiva, así como las ecuaciones de control de los elementos del sistema; $\mathbf{g}(\mathbf{y})$ es un conjunto de m funciones evaluadas en $\mathbb{R}^n (g: \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^m)$, que representan el conjunto de restricciones de desigualdad y modelan los límites físicos y operacionales del sistema. El vector de variables del sistema $\mathbf{y} \in S \subseteq \mathbb{R}^n$, en el espacio de búsqueda S , incluye el conjunto de variables de control $\mathbf{x} (\mathbf{x} \in \mathbb{R}^{sv})$ y el conjunto de variables de control $\mathbf{u} (\mathbf{u} \in \mathbb{R}^{cv})$, con límites inferior y superior representados por \mathbf{y}^{\min} y \mathbf{y}^{\max} , respectivamente. Un punto \mathbf{y} en S que satisfice el conjunto de restricciones de igualdad y desigualdad es un punto factible \mathbf{y}_F ; el conjunto finito de puntos factibles define la región factible F .

Un punto factible \mathbf{y}_F es el punto de equilibrio óptimo \mathbf{y}^* si existe un vecindario N de \mathbf{y}^* , tal que $f(\mathbf{y}^*) \leq f(\mathbf{y})$ para cualquier $\mathbf{y} \in N \in F$. El conjunto de restricciones de igualdad consiste de aquellas variables y funciones explícitamente penalizadas a los valores especificados de cualquier etapa del proceso de búsqueda de \mathbf{y}^* , y es llamado conjunto activo A . El conjunto de restricciones de desigualdad que están activas en la solución óptima es llamado conjunto ligado B . Todas las restricciones de igualdad son consideradas como activas en cualquier punto factible, ya que deben ser satisfechas incondicionalmente en la solución óptima \mathbf{y}^* de la Ecuación (1).

Modelado del enlace asíncrono basado en el VSC-HVDC

Con el fin de integrar el modelo del enlace asíncrono basado en el VSC-HVDC en la formulación de Flujos de Potencia Óptimos, es necesario representar por medio de un modelo matemático la operación de estado estacionario de los principales componentes del sistema de potencia, así como el dispositivo VSC-HVDC. En este trabajo, tales modelos se consideran en coordenadas polares y en términos de los flujos de potencia activa y reactiva.

La literatura identifica plenamente a los generadores, transformadores, cargas, líneas de transmisión y compensadores como los principales componentes de los sistemas de potencia. Los modelos de estos dispositivos son presentados a detalle en (Acha *et al*, 2004) y son los modelos adoptados en este trabajo.

La tecnología de enlaces asíncronos basados en el VSC-HVDC consiste de dos convertidores controlados por Modulación de Ancho de Pulso (PWM por sus siglas en inglés), los cuales pueden ser conectados en esquemas Back-to-Back (BtB por sus siglas en inglés) en la misma subestación o a través de un enlace de Corriente Directa (CD) en un esquema Point-to-Point (PtP por sus siglas en inglés) (ABB, 2005). En el enlace asíncrono VSC-HVDC es posible representar el voltaje de salida de ambos convertidores en el nodo i ($i=k,m$) mediante 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, como el mostrado en la Figura 1, en el que están conectados dos sistemas eléctricos de potencia asíncronos en los nodos k y m ; el sistema asíncrono que envía potencia se conecta en el nodo k , mientras que el sistema que recibe dicha potencia se conecta en el nodo m . La impedancia del transformador de acoplamiento es dada por \bar{Z}_{Ci} (Pizano *et al*, 2007).

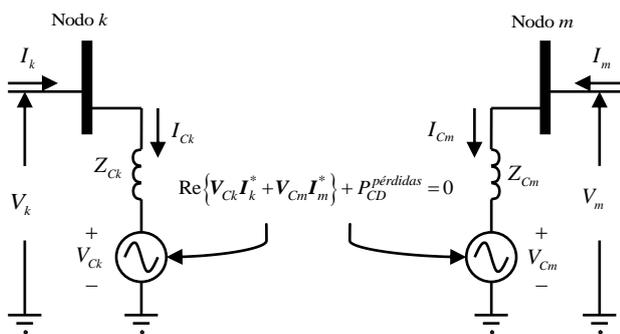


Figura 1 Circuito equivalente del enlace asíncrono basado en el VSC-HVDC.

A. Ecuaciones de flujos de potencia

A partir del circuito equivalente anterior del sistema VSC-HVDC, es posible obtener las ecuaciones de inyección de potencia en el nodo k y m (Pizano *et al*, 2007).

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

$$Q_{ij}^{inj} = -V_i^2 B_{Ci} - V_i V_{Ci} \begin{bmatrix} G_{Ci} \sin(\theta_i - \theta_{Ci}) \\ - B_{Ci} \cos(\theta_i - \theta_{Ci}) \end{bmatrix} \quad (3)$$

donde $G_{Ci} + jB_{Ci} = 1/Z_{Ci}$. Las ecuaciones de flujos de potencia en el convertidor conectado al nodo $i=k,m$, son dadas como sigue,

$$P_{Ci}^{inj} = V_{Ci}^2 G_{Ci} - V_{Ci} V_i \begin{bmatrix} G_{Ci} \cos(\theta_{Ci} - \theta_i) \\ + B_{Ci} \sin(\theta_{Ci} - \theta_i) \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$Q_{Ci}^{inj} = -V_{Ci}^2 B_{Ci} - V_{Ci} V_i \begin{bmatrix} G_{Ci} \sin(\theta_{Ci} - \theta_i) \\ - B_{Ci} \cos(\theta_{Ci} - \theta_i) \end{bmatrix} \quad (5)$$

La magnitud de voltaje en el lado de CA del convertidor conectado al nodo i , V_{Ci} , se relaciona con la magnitud del índice de modulación del control PWM, M_{Ci} , y con el promedio del voltaje en el enlace de CD, V_{CDi} , mediante la siguiente expresión (Acha *et al*, 2004),

$$V_{Ci} = M_{Ci} V_{DCi} / \sqrt{2} \quad M_{Ci} \in [0,1] \quad (6)$$

La magnitud, el ángulo de fase del voltaje y el índice de modulación de los convertidores, junto con el voltaje en el enlace de CD, son las variables de estado del enlace asíncrono basado en el VSC-HVDC, por lo que es necesario considerar los límites inferior y superior de dichas variables cuando se integra el modelo del enlace asíncrono en la formulación de FPO. Generalmente, no se consideran los límites del voltaje V_{CDi} , ya que este voltaje siempre es controlado a un valor especificado por tratarse del voltaje del enlace de CD de alta tensión, a través del cual se controla el flujo de potencia activa. Por tal motivo, el control del V_{CDi} se maneja como una restricción de igualdad en el modelo de FPO. La restricción asociada con el intercambio de potencia activa entre los convertidores para un esquema BtB es dada por $P_{ck} + P_{cm} = 0$, ya que la resistencia del enlace de CD es cero; mientras que para un esquema PtP el balance de potencia en el conductor del enlace de CD es dada por $P_{ck} + P_{cm} + P_{CD} = 0$.

En este caso se consideran las pérdidas en el conductor porque se tiene una resistencia diferente de cero.

B. Modos de control

Los modos de control PQ y PV se definen para este enlace asíncrono. Si la potencia activa y reactiva son controladas por el convertidor i en los valores P_{ij}^{esp} y Q_{ij}^{esp} , respectivamente, las restricciones de igualdad a ser satisfechas son (Pizano *et al*, 2007).

$$P_{ij}^{iny} - P_{ij}^{esp} = 0 \quad Q_{ij}^{iny} - Q_{ij}^{esp} = 0 \quad (7)$$

Si la potencia activa y la magnitud de voltaje son controladas por el convertidor i , en valores P_i^{esp} y V_i^{esp} , respectivamente, las restricciones a satisfacerse son,

$$P_i^{iny} - P_i^{esp} = 0 \quad V_i - V_i^{esp} = 0 \quad (8)$$

En ambos casos, el convertidor i controla la magnitud de voltaje en el valor V_{CDi}^{esp} . Esta acción de control es utilizada en la restricción de igualdad que representa el balance de potencia activa entre los dos convertidores, la cual permite calcular las pérdidas en el conductor del enlace de CD, que están dadas por $P_{CD}^{perd} = (P_{Ci}^2 R_{CD}) / (V_{CDi}^{esp})^2$.

Integración del modelo de enlaces asíncronos basados en el VSC-HVDC en FPO

En este trabajo se ha definido la formulación VSC-HVDC-FPO, el cual es desarrollado por considerar el modelo del sistema VSC-HVDC en el análisis de OPF como se describe en las siguientes secciones.

A. Función objetivo

La función objetivo $f(y)$ representa el costo total de generación de potencia activa.

$$f(y) = \sum_{i=1}^{N_g} a_i + b_i (P_{gi}) + c_i (P_{gi})^2 \quad (9)$$

donde a_i , b_i y c_i son los coeficientes de la curva del generador i . N_g es el número de generadores, cuya salida de potencia activa individual es P_{gi} .

B. Restricciones de igualdad

Con el fin de representar la operación de estado estacionario, las ecuaciones de balance de energía del sistema de potencia se deben satisfacer siempre de manera incondicional. Esto se logra mediante un conjunto de restricciones de igualdad que representan el balance de potencia activa y reactiva en todos los nodos del sistema.

$$h(y) = \left\{ \begin{array}{l} P_{gi} - P_{li} - \sum_{j \in i} P_{inij,j} - \sum_{j \in i} P_{iny,jVSC-HVDC} = 0 \\ Q_{gk} - Q_{lk} - \sum_{j \in k} Q_{inij,j} - \sum_{j \in k} Q_{iny,jVSC-HVDC} = 0 \end{array} \right\} \quad (10)$$

donde N_b es el número total de buses, $i=1,2,\dots,N_b$ y $k=1,2,\dots,N_b/k \notin N_g$. La generación y demanda de potencia activa y reactiva son P_{gi} , P_{li} y Q_{gk} , Q_{lk} , respectivamente, mientras que los subíndices iny,j y $iny,jVSC-HVDC$ representan la inyección de potencia a través del j -ésimo elemento de transmisión y del sistema VSC-HVDC.

Claramente, la incorporación de cada enlace VSC-HVDC en la formulación de OPF, implica la introducción de cuatro nuevas variables de estado y tres restricciones de igualdad asociadas con su operación. Estas restricciones son dadas por el conjunto de la Ecuación (11) como sigue.

$$h_1(y) = \left\{ \begin{array}{l} \sum_{i=k,m} V_{Ci} - M_{Ci} V_{CDi} / 2\sqrt{2} = 0 \\ \sum_{i=k,m} (V_{CDi} - V_{CDi}^{esp}) = 0 \\ P_{Ck} + P_{Cm} + P_{CD}^{perd} = 0 \end{array} \right\} \quad (11)$$

La primera ecuación establece la relación de la magnitud del voltaje del convertidor i con el índice de modulación y el voltaje del enlace de CD, Ecuación (6).

La segunda restricción de igualdad permite fijar el valor del voltaje de CD a un valor especificado, mientras que la última restricción está asociada con el intercambio de potencia activa entre los convertidores a través del enlace de CD.

Además, los modos de control del VSC-HVDC deben ser consideradas como restricciones de igualdad adicionales en la formulación de OPF, lo cual se hace mediante el conjunto adicional de restricciones siguiente:

$$h_2(y) = \begin{cases} P_i^{iny} + P_i^{esp} = 0 \\ Q_i^{iny} + Q_i^{esp} = 0 \\ V_i + V_i^{esp} = 0 \end{cases} \quad (12)$$

Como se mencionó, la primera y segunda restricción permite llevar a cabo el control de potencia activa y reactiva, respectivamente, de acuerdo con la Ecuación (7). La tercera restricción de igualdad se activa en función de la segunda, tal como se describió antes, y permite controlar la magnitud de voltaje en el nodo i a un valor especificado.

Estas acciones de control son expresadas como restricciones de igualdad y permanecen activas durante todo el proceso de optimización iterativo. Si algún modo de control del VSC-HVDC no se considera, entonces la correspondiente restricción del conjunto de la Ecuación (12) es desactivada o eliminada del conjunto activo. Se debe notar que las Ecuaciones (10)-(12) representan el conjunto completo de restricciones de igualdad de la formulación VSC-HVDC-OPF.

Es muy importante mencionar que la potencia reactiva de generación, Q_{gi} , es una función de las variables del sistema y no tiene un valor especificado en el conjunto de la Ecuación (10), por lo tanto, la restricción de balance de potencia reactiva solo puede ser establecida para los buses que no son de generación ($k \notin N_g$).

Sin embargo, el balance de potencia reactiva en los nodos de generación se efectúa de acuerdo al procedimiento aplicado para manejar los límites de generación reactiva, como se explica a detalle en la siguiente sección.

C. Restricciones de desigualdad

Los límites físicos y operacionales del sistema eléctrico de potencia, son matemáticamente modelados mediante el siguiente conjunto de restricciones de desigualdad,

$$Y = \begin{cases} P_{gi}^{\min} \leq P_{gi} \leq P_{gi}^{\max} & i=1,2,\dots,N_g \\ V_j^{\min} \leq V_j \leq V_j^{\max} & j=1,2,\dots,N_b \end{cases} \quad (13)$$

$$g(y) = \begin{cases} Q_{gi}^{\min} \leq Q_{gi} \leq Q_{gi}^{\max} & i=1,2,\dots,N_g \end{cases} \quad (14)$$

Se debe resaltar que las ecuaciones del conjunto Y son restricciones de desigualdad a variables, mientras que los límites de generación de potencia reactiva son modelados como un conjunto de restricciones de desigualdad funcional. De esta manera, el nivel de generación de potencia reactiva Q_{gi} en la Ecuación (14), es dado por la siguiente función,

$$Q_{gi} = Q_{li} + \sum_{j \in i} -V_i^2 B_{ii} + V_i V_j \begin{bmatrix} G_{ij} \sin(\theta_i - \theta_j) \\ -B_{ij} \cos(\theta_i - \theta_j) \end{bmatrix} \quad (15)$$

De acuerdo a la expresión anterior, el balance de potencia reactiva en el nodo i siempre se establece cuando el generador se encuentra operando dentro de sus límites de generación. Cuando el generador viola su límite inferior Q_{gi}^{\min} o superior Q_{gi}^{\max} , la restricción de igualdad de la Ecuación (16) es activada por el algoritmo de optimización y automáticamente se convierte en una restricción de igualdad con el fin de penalizar el nivel de generación de potencia reactiva en el límite de generación violado Q_{gi}^v ,

$$Q_{gi}^v - Q_{gi} = 0 \quad (16)$$

donde Q_{gi} es definida por la Ecuación (15). Se debe notar que la restricción anterior no solo evita la violación de los límites de generación de potencia reactiva, sino que también representa la ecuación de balance de potencia reactiva.

En la formulación VSC-HVDC-OPF definida en este artículo, los límites de las variables de estado del enlace asíncrono basado en el VSC-HVDC deben ser consideradas como un conjunto de restricciones de desigualdad como sigue,

$$Y_1 = \left\{ \begin{array}{l} V_{Ci}^{\min} \leq V_{Ci} \leq V_{Ci}^{\max} \\ \theta_{Ci}^{\min} \leq \theta_{Ci} \leq \theta_{Ci}^{\max} \\ M_{Ci}^{\min} \leq M_{Ci} \leq M_{Ci}^{\max} \\ V_{DCi}^{\min} \leq V_{DCi} \leq V_{DCi}^{\max} \end{array} \right\} \quad (17)$$

Al igual que en la Ecuación (13), las restricciones del conjunto Y_1 son también restricciones de desigualdad a variables y permiten simular los límites de operación del enlace de CD en alta tensión. Las Ecuaciones (13)-(17) forman el conjunto completo de restricciones de desigualdad de la formulación VSC-HVDC-OPF.

Casos de estudio

Dos casos de estudio para determinar puntos de equilibrio óptimos del Sistema de Potencia Interconectado Mexicano son presentados. En uno de estos casos se utiliza el VSCHVDC en una configuración de enlace asíncrono BtB, mientras que en el caso se considera un esquema PtP. En ambos casos de estudio, la tolerancia de convergencia del proceso de optimización es 1×10^{-6} .

El MIS es representado por un modelo equivalente compuesto de 190 nodos, 46 generadores, 90 cargas y 265 líneas de transmisión, las cuales operan en niveles de voltajes que van desde 115 kV hasta 400 kV (Messina & Vittal, 2005).

Los límites de voltaje en todos los nodos son establecidos en $0.94 \leq V_i \leq 1.07$ pu (por unidad), mientras que los límites de potencia activa y reactiva para todos los generadores son considerados en $0 \leq P_{gi} \leq 1250$ MW y $-250 \leq Q_{gi} \leq 350$ MVAR, respectivamente. El sistema MIS consiste de dos áreas identificadas como Área A y Área B, interconectadas a través de un enlace inter-área, tal y como se muestra en la Figura 2. En ambos casos de estudio el enlace asíncrono basado en el VSC-HVDC se utiliza para interconectar las dos áreas del sistema de potencia, con el fin de intercambiar potencia entre ellas.

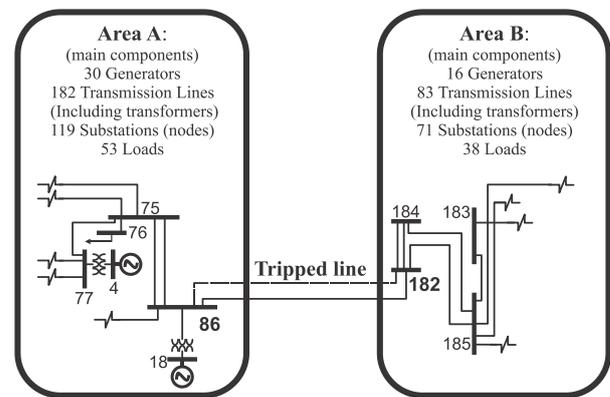


Figura 2 Enlace inter-área del Sistema Interconectado Mexicano.

Primeramente, un análisis de OPF convencional (caso base) se lleva a cabo, en el cual se calcula el punto de equilibrio óptimo de estado estacionario, sin el enlace VSC-HVDC, con un costo total de 21,093.766 \$/hr, pérdidas totales de 249.921 MW y una potencia activa transferida del Área B al Área A de 635.56 MW. En este punto de operación la magnitud de voltaje en el nodo 182 es 1.03 pu con un ángulo de fase de 19.95 grados. Entonces, el sistema MIS es modificado para conectar el sistema asíncrono basado en el VSC-HVDC; la primera fuente de voltaje se conecta al nodo 182, mientras que la segunda fuente se conecta a una nueva subestación denotada como 182a. El sistema BtB VSC-HVDC es comisionado para incrementar el flujo de potencia activa a través del enlace inter-área a 700 MW.

Las impedancias de los dos transformadores de acoplamiento del sistema asíncrono son de $0.001+j0.01$ pu y las pérdidas en estos elementos son despreciadas. Los límites superior e inferior de las fuentes de voltaje conmutadas son 1.04 pu y 0.97 pu, respectivamente. Los límites del índice de modulación se consideran entre 0.5 y 1.0 con una condición inicial de 0.8. En este caso la magnitud del voltaje del enlace de CD de alta tensión se fija en 4.0 pu.

Posteriormente, se conectan las dos áreas del sistema de potencia mexicano por medio de del enlace asíncrono basado en un esquema PTP VSC-HVDC, el cual se utiliza en lugar del esquema BtB. En este caso, el sistema asíncrono es utilizado para controlar el flujo de potencia activa a través de la conexión inter-área en 700 MW, y para fijar la magnitud de voltaje en el nodo 182 y 182a en 1 pu. Las condiciones de simulación de este caso de estudio son las mismas que en el caso anterior, sin embargo, debido a que se considera un esquema PtP, el valor de la resistencia del enlace de CD es de 0.00334 pu.

El vector de variables de estado del Sistema Interconectado Mexicano es de tamaño [436x1], incluyendo las variables del VSC-HVDC, por lo que el análisis de OPF calcula un punto de equilibrio óptimo en el cual el vector solución es de igual tamaño que el vector de variables de estado del sistema. Por tal motivo y por razones de espacio del documento, no es posible presentar la solución óptima completa, sin embargo, en la Tabla 1 se muestra un resumen de los resultados obtenidos, por medio de los cuales es posible visualizar de manera confiable el comportamiento del sistema de potencia y las capacidades de control de ambos esquemas del enlace asíncrono basado en el VSC-HVDC en el punto de equilibrio óptimo.

| Parámetro | Caso base | BtB VSC-HVDC | PtP VSC-HVDC |
|-------------------------------|-----------|--------------|--------------|
| Voltaje V_{c1} (pu) | ----- | 1.0400 | 1.0035 |
| Voltaje V_{c2} (pu) | ----- | 1.0400 | 0.9897 |
| Ángulo (grados) θ_{c1} | ----- | -28.072 | -51.228 |
| Ángulo (grados) θ_{c2} | ----- | 25.021 | 26.754 |
| Índice de mod. M_{c1} | ----- | 0.7354 | 0.7096 |
| Índice de mod. M_{c2} | ----- | 0.7354 | 0.6998 |
| Pérdidas (MW) | 249.43 | 265.56 | 269.99 |
| Pérdidas (MVar) | -6346.23 | -6319.53 | -6073.63 |
| Generación (MW) | 18607.43 | 18723.56 | 18727.99 |
| Generación (MVar) | 1862.33 | 2095.43 | 2318.18 |
| Costo total (\$/hr) | 21093.72 | 21310.39 | 21317.89 |

Tabla 1 Resumen de resultados con ambos esquemas del enlaces asíncronos en el punto óptimo.

Los resultados obtenidos y los mostrados en la tabla, muestran que para satisfacer las restricciones de igualdad y desigualdad en el punto de óptimo equilibrio, 19 y 22 voltajes violaron su límite superior en el caso del esquema BtB y PtP del VSC-HVDC, respectivamente, mientras que todos los generadores se mantuvieron dentro de sus límites y las fuente de voltaje del esquema BtB se fijaron a sus límites superiores. La Tabla 1 también muestra que ambos esquemas del sistema asíncrono VSC-HVDC efectúan bien sus acciones de control cuando son conectados al sistema MIS. Los costos de generación se incrementan cuando se integra el enlace asíncrono en el sistema, lo cual es debido al aumento del flujo de potencia a través del enlace inter-área, que provoca una redistribución de los flujos de potencia en el sistema y un aumento en las pérdidas de potencia activa; este aumento de las pérdidas de potencia activa se traduce en un aumento de la generación y por tanto en un aumento en el costo total. Debe notarse que en el caso del sistema PtP VSC-HVDC se tiene una generación de potencia activa y un costo total mayor, ya que se tienen más pérdidas de potencia activa debido a las pérdidas en el enlace de CD.

En el caso de estudio con el esquema PtP el sistema asíncrono se comisionó para controlar el voltaje en los nodos donde conectó, lo cual trae consigo una mayor demanda de potencia reactiva y por ende un nivel mayor de Vars en los nodos de generación, tal como se muestra en la tabla anterior. En las simulaciones se observó que si el voltaje en el lado del enlace de CD no es de una magnitud adecuada, entonces el algoritmo de optimización no converge, ya que el sistema asíncrono VSC-HVDC no es capaz de controlar el flujo de potencia activa en el valor especificado, sobre todo cuando se comisiona para incrementar el flujo de MW a través de los enlaces inter-áreas o inter-sistemas.

Conclusiones

Una implementación práctica del modelo de enlaces asíncronos basados en el VSC-HVDC en una formulación de Flujos de Potencia Óptimos que permite determinar puntos de equilibrio óptimos de sistemas eléctricos de potencia se ha presentado. Los casos de estudio mostraron que en el punto de óptimo equilibrio se violan diversos límites de voltaje y todos los generadores permanecen dentro de sus límites de generación. En el punto de equilibrio calculado para el sistema MIS los costos de generación se incrementan cuando se integra el enlace asíncrono VSC-HVDC en el sistema de potencia, lo cual es debido al aumento del flujo de potencia activa a través del enlace inter-área, que provoca un aumento en las pérdidas de potencia activa y un aumento de la generación. En el caso del sistema PtP VSC-HVDC se tiene una generación de potencia activa y un costo total mayor, ya que se tienen más pérdidas de potencia activa debido a las pérdidas en el enlace de CD.

Si el voltaje en el lado del enlace de CD no es de una magnitud adecuada no es posible determinar un punto de equilibrio óptimo, ya que el sistema asíncrono VSC-HVDC no es capaz de controlar el flujo de potencia activa en el valor especificado.

Esta situación es muy común cuando se incrementa el flujo de MW a través de los enlaces asíncronos inter-áreas.

Referencias

ABB Power Systems AB. *Technical Description of HVDC Light® Technology Technical Report*, 2005. Zúrich: 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.

Asplund, G. (2001). Application of HVDC Light to power system enhancement. *Proceedings 2001 IEEE-PES Winter Meeting*, 4, 2498-2503.

Ayari, M., Moez, M., Braiek, N. B. & Guillaud, X. (2013). Optimal control design for VSC-HVDC systems. *International Conference on Electrical Engineering and Software Applications*, 1-6.

Belenguer, E., Vidal, R., Beltrán, H. & Blasco, R. (2013). Control strategy for islanded operation of offshore wind power plants connected through a VSCHVDC link. *39th Annual Conference of the IEEE on Industrial Electronics Society (IECON)*, 5254-5259.

Contreras Aguilar, L. A. (2011). *Steady-tate and dynamic solutions of asynchronous links based on Variable Frequency Transformers*. (Tesis inédita de Doctorado en Ciencias). Facultad de Ingeniería Eléctrica-UMSNH, Morelia, México.

Dorn, J., Pohl, M., Retzmann, D. & Schettler, F. (2013). Transformation of the Energy System in Germany ?? Enhancement of System Stability by Integration of innovative Multilevel HVDC in the AC Grid. *Proceedings of International ETG-Congress on Security in Critical Infrastructures Today*, 1-6.

Hassink, P., Beaugard, V. O'Keefe, R. Larsen, E. & Bodo, R. (2007). Second & Future Applications of Stability Enhancement in ERCOT with Asynchronous Interconnections. *Proc. IEEE Power Engineering Society General Meeting*, 1-7.

Messina, A. R. & Vittal, V.. (2005). Assessment of nonlinear interaction between nonlinearly coupled modes using higher order spectra. *IEEE Transactions on Power Systems*, 20(1), 375-383.

Nabb, D. Mc., Nadeau, D., Nantel, A., Practico, E., Larsen, E., Sybille, G., Que Do, V. & Paré, D. (2005). Transient and dynamic modeling of the New Langlois VFT asynchronous tie and validation with commissioning tests. *Proceedings the International Conference on Power Systems Transients*.

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*, 1-6.

Pizano, A., Fuerte, C. R. & Ángeles, C. (2012). Voltage source converter based high-voltage DC system modeling for Optimal Power Flow studies. *Electric Power Components and Systems*, 40(3), 312-320.

The MathWorks, Inc. *Matlab Optimization Toolbox User's Guide Version 2, 2001*.

Natick, MA: USA. Recuperado de <http://www.mathworks.com>.