

# INTEGRACIÓN DE RESTRICCIONES OPERACIONALES DE MVA AL MODELO DEL ECDAT-FVC CON ESQUEMAS BTB-PTP PARA ESTUDIOS DE FLUJOS DE POTENCIA ÓPTIMOS

Jesus Alberto Carpio Granados (1), José Miguel García Guzmán (2), Guillermo Tapia Tinoco (2)

1 [Programa de licenciatura que cursa, Instituto Tecnológico Superior de Irapuato] | Dirección de correo electrónico: [x.suje@hotmail.com]

2 [Departamento, División, Irapuato, Instituto Tecnológico Superior de Irapuato] | Dirección de correo electrónico: [migarcia@itesi.edu.mx, gutapia@itesi.edu.mx]

## Resumen

En este trabajo se presenta una implementación práctica del modelo de Enlaces de Corriente Directa en Alta Tensión basados en Fuentes de Voltaje Conmutadas (ECDAT-FVC) con esquemas Back to Back (BtB) y Point to Point (PtP) en una formulación de Flujos de Potencia Óptimos (FPO). Las restricciones operacionales asociadas con los MVA nominales de los convertidores se integran en el modelo del ECDAT-FVC para obtener un modelo que represente de manera real el comportamiento del dispositivo cuando se utiliza para realizar análisis de FPO en sistemas eléctricos de potencia de gran escala. La implementación práctica en Flujos de Potencia Óptimos de los componentes del sistema de potencia como lo son transformadores de potencia, generadores síncronos, líneas de transmisión y compensadores en paralelo, así como el modelo del ECDAT-FVC con las restricciones de potencia aparente se realiza utilizando archivos y funciones .m de Matlab® en forma unificada con la herramienta de optimización no lineal restringida de dicho paquete computacional. Diversos casos de estudio se llevan a cabo con el Sistema Eléctrico de Potencia Interconectado Mexicano (SIM), en los cuales el controlador ECDAT-FVC se conecta entre las dos regiones principales de dicho sistema para incrementar el flujo de potencia activa entre ellas.

## Abstract

This paper presents a practical implementation of the Voltage Source Converter-High Voltage Direct Current model (VSC-HVDC) with BtB and PtP schemes into an Optimal Power Flow formulation (OPF). The operational constraints associated with rated MVA of the converters are integrated into the VSC-HVDC model in order to obtain a full model of its real performance when it is used to carry out the OPF analysis in large scale power systems. The practical implementation of power systems components in OPF, as well as the VSC-HVDC model with MVA constraints is made using files and functions of Matlab in unified scheme with the nonlinear constrained optimization toolbox of such computational package. Several numerical examples are carried out with the Mexican Interconnected Power System, in which the VSC-HVDC device is connected between the two main electrical regions of power system in order to increase the active power flow through the regions.

## Palabras Clave

Integración; límites de MVA; Flujos de Potencia Óptimos; enlaces de CD

## INTRODUCCIÓN

El ECDAT-FVC en cualquiera de sus esquemas, ya sea PtP o BtB, es considerado como uno de los controladores más completos que permite mejorar la controlabilidad y flexibilidad del sistema de potencia [1] y [2]. La primera instalación de la tecnología ECDAT comenzó su operación en el norte de Europa en 1999, este proyecto consistió en conectar Suecia con la isla de Gotland, pero debido a las características antes mencionadas se ha incrementado en gran manera el número de proyectos donde el ECDAT-FVC es instalado en varios sistemas de transmisión en todo el mundo [3] y [4]. El dispositivo ECDAT-FVC 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 [5].

Teniendo en cuenta las tendencias modernas de operación de los sistemas de energía y la creciente aplicación de los enlaces basados en el ECDAT-FVC, las capacidades del controlador deben integrarse en formulaciones matemáticas utilizadas para llevar a cabo los estudios de planificación y operación de los sistemas de energía.

Los estudios de FPO brindan respuesta en como el controlador ECDAT-FVC debe ser ajustado para satisfacer la demanda de la manera más económica satisfaciendo las restricciones operacionales del sistema y del mismo dispositivo. Sin embargo, los modelos adecuados para los estudios de FPO han tenido poca atención de los investigadores, por lo que no existen muchos modelos matemáticos que consideren la operación real de este tipo de dispositivos. En el contexto mencionado, en este trabajo se presenta un modelo completo del ECDAT-FVC con un esquema BtB y PtP, propuesto por [6], en el cual se consideran los límites de MVA y se determinan las capacidades de control del dispositivo en la operación de los sistemas de potencia.

## MATERIALES Y MÉTODOS

### 1. Modelado del Sistema Eléctrico de Potencia y del ECDAT-FVC

El sistema ECDAT-FVC consta de dos convertidores FVC conectados en serie con el Transistor Bipolar de Puerta Aislada (TBPA) y controladas por Modulación por Ancho de Pulso (MAP). De acuerdo con su aplicación, los convertidores pueden estar conectados BtB en la misma subestación o vinculados a través de un enlace común de CD denominado PtP. El control de conmutación MAP hace que sea posible tener un ajuste simultáneo de la magnitud y del ángulo fase de la tensión de salida en el convertidor de CA con voltaje constante CD. Este control permite representar el voltaje de salida de CA del convertidor en el lado  $i$  ( $i = k, m$ ) por una fuente de voltaje conmutada  $V_{Ci} = V_{Ci} \angle \theta_{Ci}$  con límites de magnitud y ángulo de fase  $V_{Ci}^{min} \leq V_{Ci} \leq V_{Ci}^{max}$  y  $0 \leq \theta_{Ci} \leq 2\pi$ , respectivamente. Por lo tanto, el enlace de transmisión ECDAT-FVC puede ser representado por un modelo basado en fuentes de voltaje conmutadas propuesto en [5], donde la impedancia del transformador de acoplamiento está dada por  $\bar{Z}_{Ci}$ .

De acuerdo al circuito equivalente de los enlaces de CD, el flujo de potencia del nodo  $i$  al  $j$  ( $i=k, m; j=k, m; i \neq j$ ) son [5],

$$P_{ij}^{inj} = V_i^2 G_{Ci} - V_i V_{Ci} \left[ G_{Ci} \cos(\theta_i - \theta_{Ci}) + \dots \right] \quad (1)$$

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

Mientras que las ecuaciones en los convertidores son dadas como sigue,

$$P_{Ci}^{inj} = V_{Ci}^2 G_{Ci} - V_{Ci} V_i \left[ G_{Ci} \cos(\theta_{Ci} - \theta_i) + \dots \right] \quad (3)$$

$$Q_{Ci}^{inj} = -V_{Ci}^2 B_{Ci} - V_{Ci} V_i \left[ G_{Ci} \sin(\theta_{Ci} - \theta_i) - \dots \right] \quad (4)$$

donde  $G_{Ci} + jB_{Ci} = 1/\bar{Z}_{Ci}$ . 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 MAP y con el promedio del voltaje del capacitor en el lado de CD,  $V_{CDi}$ , por la siguiente expresión [5],

$$V_{Ci} = M_{Ci} V_{CDi} / 2\sqrt{2} \quad M_{Ci} \in [0,1] \quad (5)$$

Las restricciones operacionales consideradas en el modelo de los Enlaces de CD en Alta tensión son las siguientes:  $V_{Ci}^{min} \leq V_{Ci} \leq V_{Ci}^{max}$ ,  $M_{Ci}^{min} \leq M_{Ci} \leq M_{Ci}^{max}$  y  $V_{DCi}^{min} \leq V_{DCi} \leq V_{DCi}^{max}$ . Cabe señalar que la última restricción sólo es aplicable cuando  $V_{CDi}$  no es controlado a un valor específico. La ecuación de restricción relacionada con el intercambio de potencia activa entre los convertidores para un esquema Back to Back ( $R_{CD}=0$ ), que está dada por  $\text{Re}\{V_{Ck}I_{Ck}^* + V_{Cm}I_{Cm}^*\} = 0$ ; mientras que para el esquema Point to Point con una resistencia en serie ( $R_{CD} > 0$ ) está dada por  $\text{Re}\{V_{Ck}I_{Ck}^* + V_{Cm}I_{Cm}^*\} + P_{CD}^{perd} = 0$ .

La potencia nominal MVA de los convertidores son considerados por la restricción de desigualdad siguiente,

$$S_{Ci} \leq S_{Ci}^n \quad (6)$$

donde  $S_{Ci} = (P_{Ci}^2 + Q_{Ci}^2)^{1/2}$  es la potencia compleja fluyendo del convertidor conectado en el nodo  $i$  ( $i=k, m$ ).

Los modos de control PQ y PV son definidos en el modelo de ECDAT-FVC de la siguiente manera [5],

$$P_{ij}^{inj} - P_{ij}^{spec} = 0 \quad Q_{ij}^{inj} - Q_{ij}^{spec} = 0 \quad (7)$$

$$P_{ij}^{inj} - P_{ij}^{spec} = 0 \quad V_i - V_i^{spec} = 0 \quad (8)$$

En ambos casos, el convertidor  $i$  controla el voltaje en el lado de CD en valor  $V_{CDi}^{esp}$ . Esta acción de control es utilizada en la ecuación de restricción que representa el balance de potencia activa entre los dos convertidores para evaluar las pérdidas en el enlace común de CD. Por lo tanto, las pérdidas de potencia activa en el enlace común de CD son  $P_{CD}^{loss} = (P_{Ci}^2 R_{CD}) / (V_{CDi}^{esp})^2$ .

## 2. Modelado explícito del ECDAT-FVC en FPO

La función objetivo es la minimización de los costos totales de generación de potencia activa dadas por,

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

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

Con el fin de representar la operación en estado estacionario del sistema de potencia, el balance de energía del sistema debe ser satisfecho incondicionalmente. Esto se logra por medio del conjunto de restricciones de balance de potencia activa y reactiva en cada bus del sistema como sigue,

$$h(y) = \begin{cases} P_{gi} - P_{li} - \sum_{j \in i} P_{inyj} - \sum_{j \in i} P_{j\_inyVSC-HVDC} = 0, \\ Q_{gk} - Q_{lk} - \sum_{j \in k} Q_{inyj} - \sum_{j \in k} Q_{j\_inyVSC-HVDC} = 0 \end{cases} \quad (10)$$

donde  $N_b$  es el número total de buses del sistema. La potencia activa y reactiva generada son  $P_{gi}$  y  $Q_{gk}$ , respectivamente. Las demandas de potencia activa y reactiva son  $P_{li}$  y  $Q_{lk}$ , respectivamente. El término  $\sum_{j \in i, k}$  es el conjunto de nodos adyacentes al nodo  $j$ , mientras que  $P_{inj}$  y  $Q_{inj}$  son la potencia activa y reactiva inyectadas en el bus  $j$  a través del  $j$ -ésimo elemento del sistema. La inyección de flujo de potencia activa y reactiva del controlador ECDAT-FVC son, respectivamente,  $P_{inj, j \in ECDAT-FVC}$  y  $Q_{inj, j \in ECDAT-FVC}$ , las cuales están dadas por (1) y (2).

Las restricciones de igualdad asociadas con la operación del ECDAT-FVC se incluyen en la formulación de FPO mediante el siguiente conjunto de restricciones,

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

La primera ecuación se relaciona con (5), la segunda es el control de  $V_{CDi}$ , mientras que la tercera ecuación corresponde a la restricción de la potencia activa del ECDAT-FVC para un sistema PtP. El conjunto de ecuaciones de control de los dispositivos FACTS en el modelo ECDAT-FVC-FPO están dadas por la ecuación (12) como sigue,

$$h_2(y) = \left\{ \begin{array}{l} P_i^{inj} + P_i^{spec} = 0, \\ Q_i^{inj} + Q_i^{spec} = 0, \\ V_i - V_i^{spec} = 0 \end{array} \right\} \quad (12)$$

Estas restricciones de igualdad están relacionadas con los modos de control del dispositivo ECDAT-FVC, que se dan por (7) y (8), donde  $i = k, m$ .

Los límites físicos y operacionales de los generadores y subestaciones son matemáticamente descritos por el siguiente conjunto de restricciones de desigualdad,

$$Y = \left\{ \begin{array}{l} P_{gi} \leq P_{gi} \leq \bar{P}_{gi}, \quad i=1,2,\dots,N_g \\ V_j \leq V_j \leq \bar{V}_j, \quad j=1,2,\dots,N_b \end{array} \right\} \quad (13)$$

$$g(y) = \{ Q_{gi} \leq Q_{gi} \leq \bar{Q}_{gi}, i=1,2,\dots,N_g \} \quad (14)$$

En las últimas ecuaciones  $P_{gi}$ ,  $Q_{gi}$  y  $V_j$  son los límites de la potencia activa y reactiva y la magnitud de voltaje del sistema de potencia, respectivamente. En la formulación de FPO los límites de las variables de estado de cada controlador ECDAT-FVC son incluidos como restricciones de desigualdad de la siguiente manera,

$$Y_1 = \left\{ \begin{array}{l} V_{Ci}^{\min} \leq V_{Ci} \leq V_{Ci}^{\max}, \quad \theta_{Ci}^{\min} \leq \theta_{Ci} \leq \theta_{Ci}^{\max}, \\ M_{Ci}^{\min} \leq M_{Ci} \leq M_{Ci}^{\max}, \quad V_{DCi}^{\min} \leq V_{DCi} \leq V_{DCi}^{\max} \end{array} \right\} \quad (15)$$

Las ecuaciones (13)-(15) son el conjunto de restricciones de desigualdad del modelo de optimización considerado en este trabajo.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El caso de estudio que se presenta es con el Sistema de Potencia Interconectado Mexicano, el cual está compuesto de 190 nodos, 46 generadores, 90 cargas y 265 líneas de transmisión. En dicho caso de estudio se utiliza el ECDAT-FVC en una configuración BtB y PtP. En ambos casos de estudio la tolerancia de convergencia del proceso de optimización es  $1 \times 10^{-6}$ . Los límites de voltaje en los nodos son establecidos en  $0.95 \leq V_i \leq 1.05$  pu, 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. Primero se lleva a cabo un estudio de FPO que se toma

como base con el dispositivo conectado; en este caso resulta un costo total de 21,093.72 \$/hr, unas pérdidas totales de potencia activa 249.43 MW y una transferencia de potencia activa entre los nodos de conexión del dispositivo de 635.56 MW. Entonces, el dispositivo ECDAT-FVC se utiliza para aumentar la potencia transferida entre las dos áreas del sistema de potencia 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 del controlador son 1.05 pu y 0.95 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. Para poder compararlos estas condiciones se estudian dos veces, una sin fijar los límites de potencia activa de las fuentes conmutadas del dispositivo, mientras que en la otra simulación se fijan en el valor mínimo permisible para esa transferencia de potencia activa sea posible.

En la Tabla 1 se muestra un resumen de los resultados obtenidos, donde se aprecian las capacidades de control del dispositivo, así como la inclusión de los límites de potencia aparente de las fuentes conmutadas del ECDAT-FVC con un esquema BtB y PtP. La resistencia del enlace de CD del esquema point to point es de 0.00334 pu, mientras que en el esquema Back t Back es 0 de acuerdo a lo mencionado antes. En la tabla es posible observar que el costo de generación se incrementa con el esquema PtP, debido al aumento de pérdidas de potencia activa en el enlace. Lo mismo ocurre con el costo cuando se consideran los límites de potencia aparente de los convertidores del dispositivo. También se observa que con límites de MVA la magnitud de voltaje y el índice de modulación de la fuente 1 disminuyen, pero estos mismos parámetros en la fuente 2 permanecen constantes, lo cual es debido a que el límite de potencia aparente se implementó en la fuente 1.

Tabla 1: Resumen de resultados con ambos esquemas del ECDAT-FVC

Parámetro	Límites de potencia MVA		Límites de MVA	
	BtB	PtP	BtB	PtP
$V_{C1}$ (pu)	1.04	1.04	0.97	0.97
$V_{C2}$ (pu)	1.04	1.04	1.04	1.04
$\theta_{C1}$ (°)	-50.41	-46.89	-	-
$\theta_{C2}$ (°)	24.66	24.48	32.68	32.32
$M_{C1}$	0.74	0.74	0.67	0.69
$M_{C2}$	0.74	0.74	0.74	0.74
$MVA_{C1}$	7.39	7.34	7.07	7.08
$MVA_{C2}$	7.07	7.073	7.05	7.05
Límites MVA	-----	----	7.07	7.08
$P_g$ (MW)	18723	18724	18719	18725
$Q_g$ (MVAR)	2111	2103	2711	2938
Costo (\$/hr)	21311	21313	21654	21680

## CONCLUSIONES

Un modelo completo del ECDAT-FVC para realizar análisis de FPO en el que se implementan las restricciones operacionales de los MVA nominales de los convertidores del dispositivo se ha presentado. La implementación de los límites de potencia aparente se realizó utilizando Matlab con un algoritmo de FPO existente desarrollado en dicho paquete computacional. Los resultados muestran que la implementación de los límites de potencia aparente se adaptaron de forma adecuada al modelado del dispositivo, lo que permitió que se integraran de manera óptima al cálculo de FPO sin aumentar el tiempo de computo o afectar el costo de generación, de manera que el modelo completo del ECDAT-FVC se vuelve apto para modelar este dispositivo de manera más real. Los resultados también muestran que con límites de MVA la magnitud de voltaje y el índice de modulación de la fuente 1 disminuyen, pero estos mismos parámetros en la fuente 2 permanecen constantes, lo cual es debido a que el límite de potencia aparente se implementó en la fuente 1. Con esquemas PtP y con los límites de potencia aparente se obtiene un costo generación mayor por un aumento en las pérdidas de potencia activa en los elementos de transmisión. Al implementar los límites de MVA, en

el punto óptimo se obtiene menos MVA, por lo que estos límites permiten modelar de manera práctica al ECDAT-FVC y evitan obtener soluciones que pueden resultar en puntos de operación de estado estacionario no reales. Al transferir la potencia activa especificada de 700 MW, el convertidor de la fuente 1 del ECDAT-FVC viola los límites de potencia MVA, de manera que su valor se fijó en el límite de MVA establecido.

## REFERENCIAS

- Asplund, G. (2001). Application of HVDC Light to power system enhancement. *Proceedings 2001 IEEE-PES Winter Meeting*, 4, 2498-2503.
- Hingorani, N. G. & Gyugyi, L. (1999). *Understanding FACTS Concepts and Technology of Flexible AC Transmission Systems*. Nueva York: IEEE Press.
- Flourentzou, N., Agelidis, V. G. & Demetriades, G. D. (2000). VSC-Based HVDC Power Transmission Systems: An Overview. *IEEE Trans. on Power Systems*, 15(2), 535-540.
- Bahrman, M.P. & Johnson, B. K. (2007). The ABCs of HVDC Transmission Technologies. *IEEE Power and Energy Magazine*, 1(1), 32-44.
- Pizano, A., Fuerte, C. R., Ambriz, H. & Acha, E. (2007). Modelling of FVC-Based HVDC Systems for a Newton-Raphson OPF Algorithm. *IEEE Transactions on Power Systems*, 22(4), 1794-1803.
- Pizano, A., Fuerte, C. R. & Ángeles, C. (2012). Voltage source converter based high-voltage CD system modeling for Optimal Power Flow studies. *Electric Power Components and Systems*, 40(3), 312-320.
- Acha, E., Fuerte, C. R., Ambriz, H., & Ángeles, C. (2004). *FACTS: Modelling and Simultaion in Power Networks*. Glaswov: John Wiley & Sons.