

Análisis y mejora de la estabilidad transitoria en un SMIB por medio de compensación de potencia eléctrica

Alberto Zambrano* Isaac Ortega-Velázquez* Michael Rojas*
Gerardo Espinosa-Pérez*

* *Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Ingeniería. (e-mail:*

alb.zambrano@hotmail.com, isaacortegavel@hotmail.com, michrojasg@comunidad.unam.mx, gerardoe@unam.mx).

Resumen.- Una medida con el cual se puede medir la estabilidad transitoria de un SEP es el tiempo crítico de liberación de falla, es bien conocido que con dispositivos de compensación como el STATCOM es posible aumentar dicha medida de desempeño. En este artículo se presenta un análisis de viabilidad del uso del HVDC como medio de mejora de la estabilidad transitoria mediante el aumento del tiempo crítico de liberación de falla.

Keywords: Tiempo critico de liberación de falla, compensación SMIB, HVDC, STATCOM, estabilidad transitoria.

1. INTRODUCCIÓN

El compensador estático síncrono (STATCOM, por sus siglas en inglés), es un convertidor que transforma corriente directa (CD) suministrada por un elemento que almacena energía, generalmente un capacitor, en corriente alterna (CA). En Haque and Kumkratug (2004) se establece que el funcionamiento general del STATCOM se asemeja a una fuente síncrona controlada por corriente, donde su principal propósito es estabilizar el voltaje de nodo mediante la inyección de potencia reactiva en el SEP, y así mejorar la estabilidad transitoria del sistema.

Los HVDC son dispositivos cuyo propósito central es transferir una cantidad específica de potencia activa entre dos nodos, si un enlace HVDC esta conectado en paralelo con un la línea de CA es posible controlar el flujo de potencia de esta línea de manera directa, por esa razón en Borazjani et al. (2015) es considerado como una buena herramienta para mejorar la estabilidad transitoria de los SEPs.

Ambos dispositivos son capaces de mejorar la estabilidad transitoria del SEP, la principal pregunta es ¿qué método es mejor para mejorar estabilidad transitoria?, para definir una respuesta científica y sólida se proponen tres casos de análisis, como primer escenario se tiene un SMIB con ambas técnicas de compensación, en este caso se realiza un análisis de la estabilidad transitoria del SEP mediante el comportamiento del tiempo crítico de liberación de falla, el segundo escenario corresponde a un análisis cualitativo de ambos dispositivos de compensación, donde se propone un modelo matemático para cada sistema así como una ley de control basada en técnicas de energía, por último se tiene el escenario de la implementación, desde un punto

de vista práctico sobre que problemas existen en ambos dispositivos desde dicho punto de vista.

El presente trabajo está organizado de la siguiente manera, en la Sección 2 se presentan los preliminares de sistemas de potencia para abordar el resultado principal del análisis, en la Sección 3 se presenta el modelo de los efectos esenciales del SMIB, el STATCOM y el HVDC así como un análisis del efecto de cada modelo, en la Sección 4 se presenta la evaluación numérica del tiempo crítico de liberación de falla y su comportamiento según el método de compensación, en la Sección 5 se muestra un modelo matemático de los dispositivos de compensación así como sus leyes de control, mientras que en la Sección 6 se muestra un análisis de viabilidad de implementación de ambos sistemas para finalmente en la Sección 7 se establecen las conclusiones y el trabajo futuro que se desprenden de este trabajo.

2. PRELIMINARES

2.1 Estabilidad transitoria y tiempo crítico de liberación de falla

En un contexto general, es posible definir la estabilidad de un SEP de la siguiente manera Kundur et al. (2004):

Definición 2.2.1 (Estabilidad de un SEP). *Es la habilidad que posee un SEP, para una condición de operación inicial dada, recuperar un estado de equilibrio de operación aceptable después de haber sido sujeto a una perturbación física, manteniendo la mayoría de las variables del sistema en rangos de magnitud adecuados de modo que prácticamente todo el sistema permanezca*

intacto.

Es pertinente establecer una definición del problema de estabilidad transitoria en términos de SEPs, de manera que nos permita entender el problema aún cuando estemos hablando en un marco de sistemas dinámicos.

Definición 2.2.2 (Estabilidad transitoria en un SEP). *Es la capacidad del sistema de potencia para mantener el sincronismo cuando es sujeto a una perturbación grave, por ejemplo un cortocircuito en una línea de transmisión. En términos de sistemas dinámicos es posible definir a la estabilidad transitoria de la siguiente forma* Sea $x_i = x_p(0) \in A(x^*)$ un punto de equilibrio asintóticamente estable de

$$\dot{x} = f_i(x(t)), \quad \infty < t < t_F \quad (1)$$

Sea t_{cr} el tiempo crítico de liberación de falla y $t = t_p - t_F$ el tiempo durante el cual el sistema está sujeto a una perturbación, si t cumple

$$x_p(t) \in A(x^*), \quad t < t_{cr}, \text{ y } x_p(t_{cr}) \in \partial A(x^*) \quad (2)$$

entonces se dice que el sistema preserva la *estabilidad transitoria*.

Para evitar que el sistema se vuelva inestable, el sistema de protecciones eléctricas toma acciones correctivas para que las variables del sistema permanezcan acotadas en un rango de valores aceptables, a este tiempo se le denomina, tiempo crítico de liberación de falla y se define de la siguiente manera:

Definición 2.2.4 (Tiempo crítico de liberación de falla, t_{cr}). *Es el intervalo de tiempo máximo que puede durar una perturbación sin perder la capacidad del sistema para recuperarse a un nuevo estado de operación aceptable.*

2.2 Sistema generador síncrono-bus infinito SMIB

Un SEP es la interconexión de unidades de generación y áreas de carga a través de líneas de transmisión, esta estructura puede ser representada con un SMIB el cual se representa en la Figura 1. Un bus infinito representa la reducción de Thevénin de toda la red, y se representa como una fuente de voltaje de magnitud y frecuencia constantes.

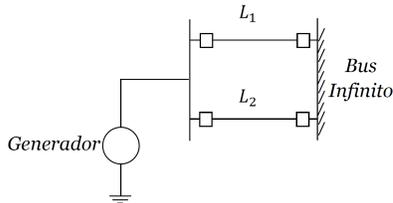


Figura 1. Generador Síncrono conectado a un Bus Infinito (SMIB)

El SMIB se representa con un modelo simplificado de segundo orden. El modelo matemático propuesto por Ortíz (2005) para el SMIB es

$$\dot{\delta} = \omega \quad (3)$$

$$\dot{\omega} = \frac{\omega_0}{2H}(P_m - P_e - D\omega) \quad (4)$$

Donde

$$P_e = \frac{1}{X'_d + X_E} E_b E'_q \text{sen}(\delta) \quad (5)$$

donde el ángulo de carga (δ) y la velocidad relativa del rotor con respecto a la velocidad síncrona (ω) son las variables de estado, (E'_q) es el voltaje interno en el eje de cuadratura, X'_d es la reactancia transitoria en el eje d , P_m es la potencia mecánica, D es el coeficiente de amortiguamiento, E_b es el voltaje del bus infinito y X_E es la reactancia equivalente de la línea.

De (3) y (4) se obtiene los puntos de equilibrio para el SMIB donde

$$\omega_* = 0 \quad (6)$$

$$\delta_* = \text{angsen} \left(\frac{X'_d + X_E}{E_b E'_q} P_m \right) \quad (7)$$

donde ω_* y δ_* son los puntos de equilibrio de los estados del SMIB, para que los puntos de equilibrio existan se debe cumplir la siguiente restricción

$$-\frac{E_b E'_q}{X'_d + X_E} \leq P_m \leq \frac{E_b E'_q}{X'_d + X_E} \quad (8)$$

con base en la restricción anterior y en el comportamiento físico del SMIB es posible establecer la región de operación con el siguiente conjunto cerrado

$$D_\epsilon = \{x \in \mathbb{R}^2 : 0 \leq x_1 \leq \frac{\pi}{2} - \epsilon\} \quad (9)$$

donde ϵ es un número suficientemente pequeño.

Existen dos puntos de equilibrio, un punto que es asintóticamente estable $x_* = \{x_{1*}, 0\}$ que se encuentra dentro de la región (9) y uno inestable que corresponde a valores de $x_{1*} > \frac{\pi}{2}$, para demostrar la estabilidad asintótica se propone la función de energía del SMIB como función candidata de Lyapunov

$$V(x) = \frac{1}{2}x_2^2 - a_1 P_m (x_1 - x_{1*}) + a_1 b_1 (\cos(x_{1*}) - \cos(x_1)) \quad (10)$$

donde $b_1 = \frac{E_b E'_q}{X'_d + X_E}$ y $a_1 = \frac{\omega_0}{2H}$. El punto de mínima energía de (10) se encuentra en $(x_{1*}, 0)$ y la derivada de dicha función a lo largo de las trayectorias del sistema es

$$\dot{V} = -D a_1 x_2^2 \leq 0 \quad (11)$$

3. MÉTODOS DE MEJORA DE DESEMPEÑO

3.1 Forma general de compensación

Considere el modelo del SMIB dado por las ecuaciones (3) y (4), en donde el efecto de compensación afecta de manera directa a la segunda de éstas, dando como resultado la siguiente expresión

$$\dot{\omega} = \frac{\omega_0}{2H}(P_m - P_e - D\omega + \Delta(\delta, x)) \quad (12)$$

donde la función de potencia $\Delta(\delta, x)$ depende del dispositivo ha analizar. Adicionalmente, el efecto esencial, tanto del STATCOM como del HVDC, puede ser representado por un modelo reducido de primer orden con la siguiente estructura

$$\dot{x} = -\frac{1}{T}(x_* - x) \quad (13)$$

en donde x puede ser corriente I_S en el caso del STATCOM o potencia P_{DC} en el caso del HVDC.

3.2 STATCOM

La ecuación que captura el efecto esencial del STATCOM es

$$\dot{I}_S = -\frac{K_S}{T_S}(I_{SET} - I_S) \quad (14)$$

donde I_S es la corriente de inyección del STATCOM, el factor $\frac{K_S}{T_S}$ esta asociado con el desempeño de la corriente de inyección e I_{SET} es la corriente que se desea que el STATCOM inyecte para realizar el proceso de compensación.

3.3 SMIB-STATCOM

Suponga que ahora se conecta un STATCOM a mitad de las líneas de transmisión, tal y como se muestra en la Figura 2.

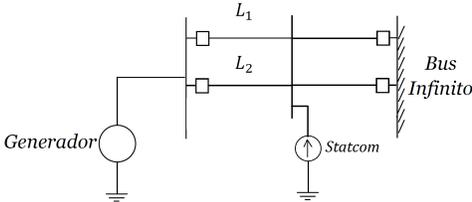


Figura 2. Sistema SMIB-STATCOM

El modelo matemático del SMIB-STATCOM esta formado por el conjunto de ecuaciones (3), (4) y el modelo de primer orden del STATCOM dado por (14). En donde la potencia de compensación es la siguiente

$$\Delta(\delta, I_S) = \frac{E'_q X_E}{X'_d + X_E} \text{sen}(\delta - \delta_m) I_S \quad (15)$$

donde

$$\delta_m = \text{angtan} \left(\frac{E'_q X_E \text{sen}(\delta)}{E_B X'_d + E'_q X_E \text{cos}(\delta)} \right) \quad (16)$$

3.4 HVDC

En el caso del HVDC, la ecuación que captura el efecto principal del HVDC es la siguiente

$$\dot{P}_{DC} = \frac{1}{T_{DC}}(P_{SET} - P_{DC}) \quad (17)$$

donde P_{SET} es la potencia deseada de compensación del HVDC, P_{DC} es la potencia que inyecta el HVDC al SEP y T_{DC} es la constante de tiempo del sistema de primer orden.

3.5 SMIB-HVDC

Ahora considere la situación en la que se incluye un enlace HVDC en paralelo con las dos líneas de transmisión en el sistema SMIB, como se observa en la Figura 3.

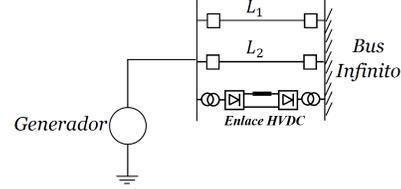


Figura 3. Sistema SMIB-HVDC

La inclusión del enlace HVDC, según Eriksson (2013), Shi and Wang (2014) y Pai et al. (1981), se modela como una ecuación diferencial de primer orden. Sin pérdida de generalidad, la dinámica de este sistema con el SMIB está dado por las ecuaciones (3), (4) y (17), en donde la potencia de compensación esta dada por

$$\Delta(P_{DC}) = P_{DC} \quad (18)$$

4. EVALUACIÓN NUMÉRICA DEL TIEMPO CRÍTICO DE LIBERACIÓN DE FALLA

Para la validación numérica se consideran tres sistemas SMIB uno sin compensación, el segundo conectado con un STATCOM y el último con un HVDC. Los sistemas están en un punto de equilibrio, a los 10 segundos de la simulación se modifica la estructura del SMIB conectando un STATCOM y un HVDC, por lo cual, se modifica el punto de equilibrio inicial, a los 30 segundos ocurre una falla en el sistema eléctrico, que provoca que el sistema comience a alejarse del punto de equilibrio en el que estaba operando, si la falla pasa el tiempo critico, entonces

el sistema sale de la región de atracción del punto de equilibrio, por lo tanto, se pierde estabilidad transitoria del sistema eléctrico de potencia. Los parámetros para el experimento son los mostrados en el Cuadro 1.

Parámetro	Valor	unidades
H	6	[s]
f	60	[Hz]
ω_0	$2\pi f$	$[\frac{rad}{s}]$
P_m	1.51	[p.u.]
x_d	0.3	[p.u.]
x_e	0.3	[p.u.]
T_{HVDC}	1	[s]
$T_{STATCOM}$	1	[s]
P_{set}	0.1	[p.u.]
I_{set}	0.155	[p.u.]

Cuadro 1. Parámetros del sistema

En la Figura (4) se observa que el ángulo de carga del SMIB es de 83.01° , a los $10[s]$ se conecta el STATCOM y el HVDC, los cuales reduce al ángulo de carga a 80.4° y 68.04° respectivamente, la velocidad relativa es cero antes y después de conectar el STATCOM y el HVDC, con esto se puede concluir que al conectar el STATCOM y el HVDC se modifica el punto de equilibrio del sistema, sin embargo, con el HVDC se disminuye más el ángulo de carga, con la misma referencia de potencia para el STATCOM y el HVDC. En el tiempo $t = 30[s]$ ocurre una falla en el sistema que dura $91[ms]$ y es posible observar que el SMIB y el SMIB-STATCOM no regresan al punto de equilibrio como se logra con el HVDC.

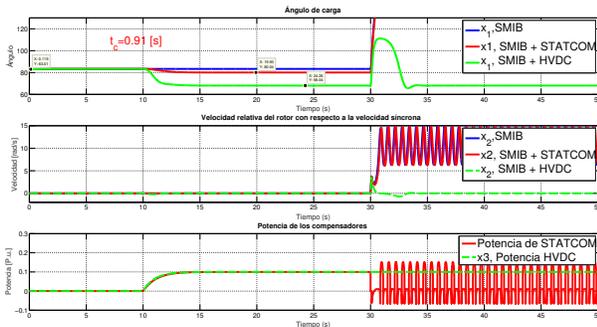


Figura 4. Comparación del sistema SMIB contra sistema SMIB+STATCOM y sistema SMIB+HVDC, con un tiempo de liberación de falla de $91[ms]$

En esta sección quedo demostrado que el HVDC aumento el t_{cr} del SMIB de una manera mucho más significativa dando una conclusión parcial de su uso como dispositivo de compensación. Cabe mencionar que el análisis aquí mostrado no tiene una prueba formal de la existencia de la región de atracción debido a que dicha prueba sobrepasa el objetivo de este artículo, además el uso de modelos simplificados no permite que la conclusión sea contundente con respecto a la viabilidad del uso del HVDC para mejorar la estabilidad transitoria de un SMIB. Por lo tanto, en la siguiente sección se trabajará con modelos dinámicos más detallados de ambos sistemas

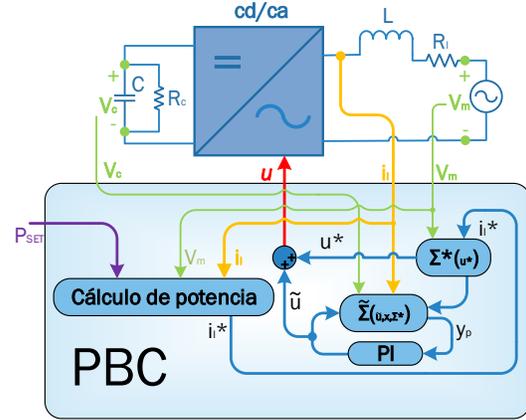


Figura 5. STATCOM con su sistema de control

de compensación, con el fin de evaluar la dificultad en el diseño de sus leyes de control.

5. MODELO DINÁMICO DEL STATCOM Y HVDC

5.1 STATCOM

El primer sistema de estudio es el STATCOM que se muestra junto con su estrategia de control en la Figura 5. Si se toman las leyes constitutivas de los elementos y las leyes de voltajes y corrientes de Kirchhoff se puede obtener el modelo matemático (19-20), el cual pertenece a una clase de sistemas conocidos como sistemas bi-lineales, ya que la señal de control multiplica al estado.

$$C \frac{dV_c}{dt} + \frac{1}{R_c} V_c + u i_l = 0 \quad (19)$$

$$L \frac{d i_l}{dt} + R_l i_l - u V_c = -V_m \quad (20)$$

Para el diseño de la ley de control, se realiza un cambio de variables, definiendo $q_c = CV_c$ y $\phi_l = Li_l$, en forma matricial queda representado como

$$\dot{x} = [uJ - R] \nabla_x H(x) + E \quad (21)$$

donde

$$H(x) = \frac{1}{2} x^T D x; \quad x = \begin{bmatrix} q_c \\ \phi_l \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix}; \quad E = \begin{bmatrix} 0 \\ -V_m \end{bmatrix}$$

$$R = \begin{bmatrix} \frac{1}{R_c} & 0 \\ 0 & R_l \end{bmatrix}; \quad J = \begin{bmatrix} 0 & -1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}; \quad D = \begin{bmatrix} \frac{1}{C} & 0 \\ 0 & \frac{1}{L} \end{bmatrix}$$

Una de las principales problemáticas de este tipo de sistemas es el diseño de la ley de control, por lo cual se sigue una metodología de diseño para sistemas bi-lineales reportada en Cisneros et al. (2015), que consiste en obtener un sistema incremental a partir del sistema deseado y algunas mediciones del estado, con esto se obtiene un sistema $\tilde{\Sigma}$ que es pasivo desde $\tilde{u} \rightarrow y_p$, una vez teniendo este mapa pasivo se propone una ley de control pasiva que asegure que el sistema tiende al sistema deseado, en este caso que se cumpla que

$$\lim_{t \rightarrow \infty} (x_2 - x_2^*) = 0$$

El controlador esta dado por

$$\begin{aligned}\dot{\zeta} &= -y_p \\ \tilde{u} &= -k_p y_p + k_i \zeta\end{aligned}$$

donde $k_p = k_p^T > 0$, $k_i = k_i^T > 0$, salida pasiva definida por $y_p = V_c^* i_l - i_l^* V_c$ y con señal de control $u = \tilde{u} + u^*$.

El experimento que se realizó fue una simulación en matlab, se considera que el STATCOM entrega energía a la fuente V_m en los primeros 2.5[s], después de este tiempo el STATCOM consume energía de la fuente. En la Figura 6 se puede observar el comportamiento de las potencias en el STATCOM, en donde la potencia entregada a la fuente V_m más las pérdidas del sistema es la misma que la potencia de referencia, por lo tanto es posible concluir que se cumple el objetivo de control del STATCOM con la ley de control propuesta.

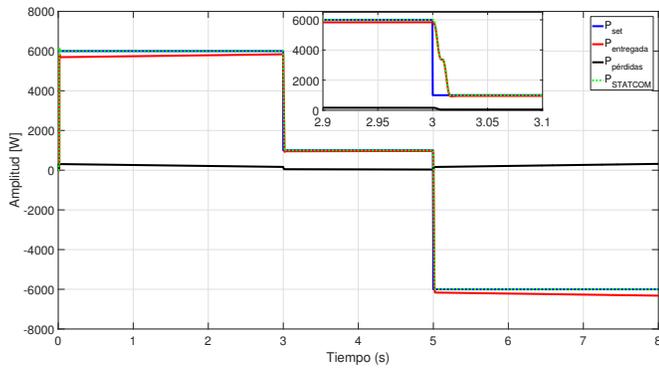


Figura 6. Potencia de salida del STATCOM

5.2 HVDC

El sistema HVDC considerado se puede observar en la Figura 7 junto con el controlador propuesto. El modelo matemático del HVDC se muestra en las ecuaciones (22-26), que también es un sistema bi-lineal con dos entradas de control.

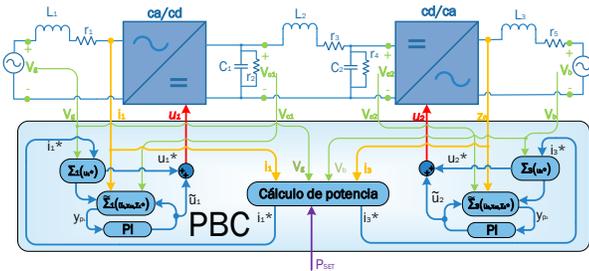


Figura 7. Sistema de control para el HVDC

$$L_1 \frac{di_1}{dt} + r_1 i_1 + u_1 V_{c1} = V_g \quad (22)$$

$$C_1 \frac{dV_{c1}}{dt} + \frac{1}{r_2} V_{c1} + i_2 - u_1 i_1 = 0 \quad (23)$$

$$L_2 \frac{di_2}{dt} + r_3 i_2 - V_{c1} + V_{c2} = 0 \quad (24)$$

$$C_2 \frac{dV_{c2}}{dt} + \frac{1}{r_4} V_{c2} + u_2 i_3 - i_2 = 0 \quad (25)$$

$$L_3 \frac{di_3}{dt} + r_5 i_3 - u_2 V_{c2} = -V_b \quad (26)$$

Este sistema posee dos señales de control, por lo tanto el análisis propuesto se basa en una interconexión de sistemas como lo reportado en Ortega I. et al. (2016), y de esta forma poder seguir una metodología de diseño similar al del STATCOM. Para este sistema el controlador esta dado por

$$\begin{aligned}\dot{\zeta}_1 &= -y_{p1} \\ \dot{\zeta}_2 &= -y_{p2} \\ \tilde{u}_1 &= -k_{p1} y_{p1} + k_{i1} \zeta_1 \\ \tilde{u}_2 &= -k_{p2} y_{p2} + k_{i2} \zeta_2\end{aligned}$$

donde $k_{p1} = k_{p1}^T > 0$, $k_{i1} = k_{i1}^T > 0$, $k_{p2} = k_{p2}^T > 0$, $k_{i2} = k_{i2}^T > 0$, las salidas pasivas están definidas por $y_{p1} = i_1^* V_{c1} - i_1 V_{c1}^*$ y $y_{p2} = V_{c2}^* i_3 - V_{c2} i_3^*$ y señales de control $u_1 = \tilde{u}_1 + u_1^*$ y $u_2 = \tilde{u}_2 + u_2^*$.

En la Figura 8 se puede observar claramente que la potencia de entrada al HVDC no es igual a la potencia de salida, específicamente se puede observar antes del segundo 0.5[s] donde la potencia de salida es cero, esto se debe a que en este tiempo el HVDC debe cargar el bus de CD.

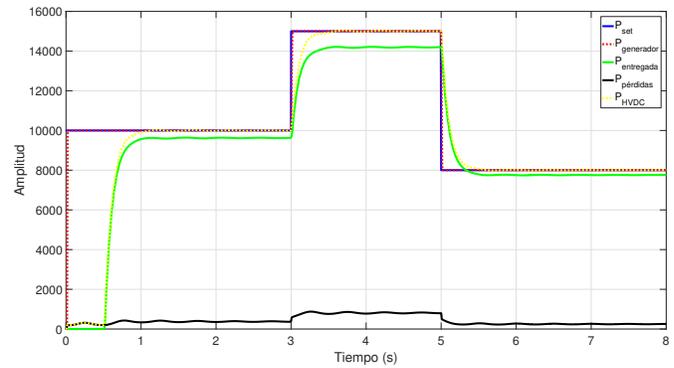


Figura 8. Gráfica de potencia en el HVDC

6. VIABILIDAD: HVDC Y STATCOM

A la hora de implementar un sistema HVDC se deben tener en cuenta los siguientes aspectos en los estudios de viabilidad:

- Para que sea viable un sistema de transmisión HVDC uno de los factores principales a tomar en cuenta es

la distancia a la que se va a transmitir la potencia eléctrica, esta tiene que ser representativa para que se justifique la inversión, esto debido al alto costo de los equipos y componentes del sistema Kim et al. (2009).

- Son sistemas que requieren de un mantenimiento mínimo, obteniendo beneficios económicos en ahorros de este recurso, son equipos diseñados a tener un tiempo de vida útil considerable, esto se refleja en eficiencia energética representando ahorros en el mercado de energía eléctrica, evitando cortes de energía.

STATCOM

- Este dispositivo es más fácil y sencillo de instalar, ya que ocupa menos espacio y emplea dispositivos electrónicos encapsulados haciéndolo una opción más viable a considerar para la compensación y mejora en los márgenes de estabilidad de los SEPs
- Son sistemas que además de incrementar la transmisión de potencia, estabilizan los niveles de tensión en puntos débiles de la red Grünbaum et al..

7. CONCLUSIONES

En la comunidad de sistemas de potencia existen métodos basados en la compensación de la transmisión de potencia que permiten mejorar la estabilidad transitoria del SEP. En el presente trabajo se abordó la problemática de mejorar la estabilidad de un sistema generador bus infinito, mediante el uso de un dispositivo FACT (STATCOM) y un enlace HVDC. Con el uso de estos dos métodos se logró aumentar el tiempo crítico de liberación de falla t_{cr} , pero con las ventajas y desventajas que ofrece cada compensador. Si bien se trabajó con modelos simplificados, para el caso de los modelos de primer orden, éstos nos permitieron establecer un primer paso en el entendimiento claro del impacto y respuesta de los dispositivos FACTS en los estudios de estabilidad, además de que se establecieron las bases para un análisis desde la perspectiva de sistemas dinámicos. De acuerdo a los análisis que se hicieron podemos mencionar lo siguiente:

- Sistema SMIB-HVDC
 - Incrementa el t_{cr} de manera significativa. Esto se debe a que toda la potencia eléctrica generada es transmitida por el enlace HVDC, de forma que al considerar que la falla ocurre en la línea de transmisión de CA, la potencia continua transmitiéndose por la línea de CD.
 - Los costos de implementación son muy caros para esta tecnología, además donde su principal función es transportar energía eléctrica a grandes distancias, por lo que no es una solución rentable para la solución a este tipo de problemas.
 - Con base en la comparación realizada, el enlace HVDC mejora de manera significativa la estabilidad transitoria, haciendo que la región de atracción del punto de equilibrio sea asintóticamente estable.

- Sistema SMIB-STATCOM

- Se logró aumentar en un 80% el t_{cr}
- El agrandamiento de la región de atracción con este compensador es limitado por su composición física, es decir, la cantidad de potencia que se puede extraer de éste se encuentra limitado por los parámetros eléctricos del compensador.
- Su principal aplicación es la compensación de potencia reactiva al sistema y la estabilidad de voltaje.

Como trabajo futuro queda demostrar a través de análisis de puntos de equilibrio la región de atracción. Con respecto al análisis de la falla, queda pendiente realizar la estimación del CCT para fallas de tipo asimétricas así como considerar el comportamiento dinámico del SMIB en estado de posfalla.

REFERENCIAS

- Borazjani, O., Rajabi, A., Saeedimoghadam, M., and Isapour, K. (2015). Stability improvement of ac system by controllability of the hvdc. *World Academy of Science, Engineering and Technology, International Journal of Electrical, Computer, Energetic, Electronic and Communication Engineering*, 9(3), 371–378.
- Cisneros, R., Pirro, M., Bergna, G., Ortega, R., Ippoliti, G., and Molinas, M. (2015). Global tracking passivity-based pi control of bilinear systems: Application to the interleaved boost and modular multilevel converters. *Control Engineering Practice*, 43, 109–119.
- Eriksson, R. (2013). On the centralized nonlinear control of hvdc systems using lyapunov theory. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 28(2), 1156–1163.
- Grünbaum, R., Noroozian, M., and Thorvaldsson, B. (????). Facts, poderosos sistemas para una transmisión flexible de la energía. *Rev. ABB*, 5(99), 4–17.
- Haque, M. and Kumkratug, P. (2004). Application of lyapunov stability criterion to determine the control strategy of a statcom. *IEE Proceedings-Generation, Transmission and Distribution*, 151(3), 415–420.
- Kim, C.K., Sood, V.K., Jang, G.S., Lim, S.J., and Lee, S.J. (2009). *HVDC transmission: power conversion applications in power systems*. John Wiley & Sons.
- Kundur, P., Paserba, J., Ajarapu, V., Andersson, G., Bose, A., Canizares, C., Hatziargyriou, N., Hill, D., Stankovic, A., Taylor, C., et al. (2004). Definition and classification of power system stability iee/cigre joint task force on stability terms and definitions. *IEEE transactions on Power Systems*, 19(3), 1387–1401.
- Ortega I., V., Trejo D., E., and Pérez G., E. (2016). Control basado en pasividad para mppt en sistemas fotovoltaicos conectados a la red eléctrica. *CLCA*.
- Ortiz, P.M. (2005). *Control no lineal de sistemas eléctricos de potencia*. Ph.D. thesis, Universidad Nacional Autónoma de México.
- Pai, M., Padiyar, K., and Radhakrishna, C. (1981). Transient stability analysis of multi-machine ac/dc power systems via energy-function method. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, (12), 5027–5035.