

ANEXO (PROYECTO 2008)

RESUMEN

El avance de la tecnología de sistemas de alta tensión de corriente directa por sus siglas en inglés (HVDC) ofrece beneficios con respecto a los sistemas de alta tensión de corriente alterna (HVAC). Se presenta un estudio de flujos de potencia aplicado a un sistema de dos máquinas cuatro nodos incorporando el enlace de HVDC, con el algoritmo de Newton-Raphson utilizando el programa en MATLAB propuesto en este proyecto. Así como la descripción de los diferentes métodos de solución para el enlace de CD.

Para el análisis de estabilidad ante pequeños disturbios se considera la influencia de un enlace de Alto Voltaje de Corriente Directa (HVDC) que tiene la habilidad de controlar la potencia transmitida rápidamente. Por lo tanto tiene un impacto importante sobre la estabilidad de del sistema eléctrico de potencia (SEP), para dicho análisis, se considera como sistema de prueba el sistema máquina bus infinito se plantea el modelo de máquina clásico y la aplicación a un sistema interconectado de dos áreas y el modelo transitorio con lazos de control primario por último se da el planteamiento considerando un enlace de HVDC. La simulación se llevó a cabo con el programa de MATLAB.

INTRODUCCIÓN

En los últimos 20 años se han hecho diversos estudios en todo el mundo para introducir enlaces de HVDC en la transmisión de los sistemas eléctricos de potencia, en nuestro país se han estudiado diversos proyectos para aumentar la capacidad de transmisión. Actualmente existe interés en aumentar la participación de México en los mercados eléctricos de EUA y Centroamérica determinando nuevas interconexiones.

La técnica de transmisión de energía en CD ha dado pruebas de ser un medio práctico para transportar grandes cantidades de energía eléctrica a través de distancias de transmisión largas.

El análisis para definir las interconexiones es una actividad prioritaria en el proceso de planificación del sistema nacional de energía y permiten el acceso a otros mercados competitivos para compra o venta de electricidad.

Si debido a los tamaños relativos de los sistemas eléctricos y la característica física de las interconexiones no es posible su operación síncrona permanente, se pueden utilizar enlaces asíncronos con base en las diversas tecnologías disponibles.

En dichos estudios se debe tener en cuenta diversos criterios, a la hora de elegir entre un sistema de corriente HVAC ó de un sistema de HVDC en la transmisión de energía eléctrica. Es por eso que presentamos algunos aspectos a tomar en cuenta como son:

- ¿Cuánta potencia se planea transferir entre los sistemas y en que dirección?
- ¿Cuáles son los requerimientos de confiabilidad?
- ¿Es económico?
- ¿La frecuencia de los sistemas es la misma?
- ¿Entre que subestaciones deberá instalarse la interconexión?
- ¿Aspectos medioambientales permisos etc.?

Podemos inicialmente definir que existen dos soluciones completamente diferentes para la interconexión de dos redes de potencia:

1. Un enlace en corriente alterna (HVAC)
2. Un enlace en corriente directa (HVDC)

En el presente proyecto se estudia la estabilidad angular ante pequeños disturbios considerando la influencia de un HVDC, el cual tiene un impacto importante en cuanto a la estabilidad de los sistemas, también se plantean los modelos de transmisión más representativos de corriente directa (CD)

. Aplicación del análisis modal, el modelo del sistema dinámico es puesto en variables de estado y describe también la solución no convencional (perturbaciones en cada estado). En los resultados se muestran tablas comparativas del impacto que tienen los sistemas de CD en los SEP's. Para dicho análisis se considera cómo sistema de prueba el sistema de dos áreas.

El análisis de estabilidad dinámica se lleva a cabo bajo la premisa de que el sistema está sujeto a pequeños disturbios a partir de su condición de estado estacionario. Los pequeños disturbios pueden ser temporales o permanentes, si el sistema es estable e inmediatamente después ocurre un disturbio temporal, el sistema debería regresar al estado inicial antes del disturbio, pero si ocurre un disturbio permanente puede darse el caso de que sistema regresará a un punto de estado diferente al de predisturbio.

Si las perturbaciones son pequeñas, las variables de estado o los parámetros del sistema presentan un cambio muy ligero, es decir, poco notable. Lo anterior desde el punto de vista matemático se dice que la operación está en la vecindad de un estado cuasiestacionario.

Dado el limitado rango de operación, un sistema no lineal puede ser representado matemáticamente como sistema lineal, es decir, dicho sistema puede ser linealizado.

Por lo tanto, si la descripción matemática del sistema se da en variables de estado descritas por un conjunto de ecuaciones diferenciales de primer orden, de la forma siguiente,

$$\dot{X} = Ax + Bu$$

Donde la respuesta libre del sistema (también llamada respuesta natural) se puede determinar por medio de los eigenvalores de la matriz A.

MÉTODOS DE SOLUCIÓN PARA FLUJOS DE POTENCIA CON ENLACES DE HVDC.

Una gran variedad de algoritmos han sido desarrollados para el modelo de enlaces de CD con el método de Newton-Raphson en estudios de flujos de potencia. Los métodos usados para modelar los enlaces de CD se clasifican como siguen:

Método de solución unificado

Este método combina de manera simultánea las variables de estado correspondientes a los sistemas de CA y CD en un mismo marco de referencia, para una solución numérica de las ecuaciones del sistema de CA y

CD mediante una técnica iterativa de Newton-Raphson, como se muestra en la ecuación. En este caso el método requiere que la matriz jacobiana sea modificada con el objeto de incorporar las contribuciones correspondientes a los enlaces. La desventaja de este método es que es difícil combinar con técnicas avanzadas de flujos de potencia de CA, tales como Newton-Raphson desacoplado rápido.

Cuando incluimos la línea de CD en flujos de potencia, las ecuaciones de los incrementos en las terminales de los convertidores en los nodos de CA tienen que ser modificados.

Método Secuencial

En este método las variables de estado son las magnitudes de voltaje y los ángulos, las cuales son calculadas por la técnica de Newton-Raphson en CA. Mientras que para la solución de las ecuaciones del enlace de CD son calculadas en forma algebraica o iterativa el método continúa la solución secuencial del primer conjunto de ecuaciones de CA, después son resueltas las ecuaciones de CD utilizando los valores iniciales obtenidos por la solución previa, hasta que el criterio de convergencia predefinido es alcanzado. El método es fácil de programar pero puede presentar problemas de convergencia en ciertas situaciones, en las ecuaciones vemos la solución del método secuencial .

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial P}{\partial \delta} & \frac{\partial P}{\partial V} \\ \frac{\partial Q}{\partial \delta} & \frac{\partial Q}{\partial V} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \theta \\ \Delta V \end{bmatrix}$$

$$[\bar{R}] = [J_{CD}] [\Delta X]$$

Donde \bar{R} son las ecuaciones del modelo del convertidor descrito anteriormente en las ecuaciones, y cuatro ecuaciones de control, ΔX son las variables de CD.

El proceso del método secuencial es: Cálculo de $\Delta \bar{P}$ y $\Delta \bar{Q}$, solución de la ecuación y actualizar, $\Delta \bar{\theta}$ y $\Delta \bar{V}$.

Cálculo de residuales de CD, \bar{R} , solución de la ecuación y actualización de las variables de estado de X .

Regresar hasta que la convergencia establecida sea alcanzada.

Con el método secuencial, las ecuaciones de CD no necesitan ser resueltas en el proceso iterativo. Una vez que las ecuaciones residuales R convergen, el sistema de CD puede ser modelado simplemente como inyecciones de potencia activa y reactiva en las terminales del nodo del convertidor.

Método de eliminación de variable

El principio básico de la solución de este método es muy simple, elimina todas las variables de CD y deriva las expresiones para la potencia real y reactiva consumida en los nodos de CA en las terminales del convertidor

Matemáticamente se tiene:

$$\begin{aligned} P_{dR} &= f_R(V_{tR}, V_{tI}) \\ P_{dI} &= f_I(V_{tR}, V_{tI}) \\ Q_{dR} &= g_R(V_{tR}, V_{tI}) \\ Q_{dI} &= g_I(V_{tR}, V_{tI}) \end{aligned}$$

Se deben derivar parcialmente las ecuaciones de la potencia real y reactiva con respecto a los voltajes en las terminales de de CA de los convertidores, cada una de estas derivadas parciales se agregan en los elementos propios del jacobiano. De tal manera que las ecuaciones linealizadas de flujos de potencia están dadas por

Solamente los elementos del jacobiano de las submatrices N' y L' asociados con las terminales de CA del convertidor son modificados de la siguiente manera,

$$\begin{aligned} N'(tR, tR) &= V_{tR} \frac{\partial P_{tR}^{ca}}{\partial V_{tR}} + V_{tR} \frac{\partial P_{dR}(V_{tR}, V_{tI})}{\partial V_{tR}} \\ N'(tR, tI) &= V_{tI} \frac{\partial P_{tR}^{ca}}{\partial V_{tI}} + V_{tI} \frac{\partial P_{dR}(V_{tR}, V_{tI})}{\partial V_{tI}} \\ N'(tI, tR) &= V_{tR} \frac{\partial P_{tI}^{ca}}{\partial V_{tR}} - V_{tR} \frac{\partial P_{dI}(V_{tR}, V_{tI})}{\partial V_{tR}} \\ N'(tI, tI) &= V_{tI} \frac{\partial P_{tI}^{ca}}{\partial V_{tI}} - V_{tI} \frac{\partial P_{dI}(V_{tR}, V_{tI})}{\partial V_{tI}} \end{aligned}$$

Donde $V_t \frac{\partial P_t^{ca}}{\partial V_t}$ referidos al rectificador y al inversor son los componentes modificados en el jacobiano.

Las modificaciones para L' de la ecuación son:

$$\begin{aligned} L'(tR, tR) &= V_{tR} \frac{\partial Q_{tR}^{ca}}{\partial V_{tR}} + V_{tR} \frac{\partial Q_{dR}(V_{tR}, V_{tI})}{\partial V_{tR}} \\ L'(tR, tI) &= V_{tI} \frac{\partial Q_{tR}^{ca}}{\partial V_{tI}} + V_{tI} \frac{\partial Q_{dR}(V_{tR}, V_{tI})}{\partial V_{tI}} \\ L'(tI, tR) &= V_{tR} \frac{\partial Q_{tI}^{ca}}{\partial V_{tR}} + V_{tR} \frac{\partial Q_{dI}(V_{tR}, V_{tI})}{\partial V_{tR}} \\ L'(tI, tI) &= V_{tI} \frac{\partial Q_{tI}^{ca}}{\partial V_{tI}} + V_{tI} \frac{\partial Q_{dI}(V_{tR}, V_{tI})}{\partial V_{tI}} \end{aligned}$$

Donde $V_t \frac{\partial Q_t^{ca}}{\partial V_t}$ referidos al rectificador y al inversor son los componentes modificados en el jacobiano.

Del planteamiento se observa que el enlace modifica las cuatro ecuaciones de diferencia de potencia y los ocho elementos del jacobiano, pero no se agregan nuevas variables en el vector solución.

Modelo transitorio del generador.

El modelo es de cuarto orden, esta formado por dos ecuaciones diferenciales de primer orden, que representan los transitorios eléctricos y dos ecuaciones diferenciales que representan los transitorios

electromecánicos de la maquina síncrona.

$$\frac{d}{dt}\omega = \frac{1}{2H}(P_m - P_e - K_D\Delta\omega_r)$$

$$\frac{d}{dt}\delta = \omega_0\Delta\omega_r$$

$$\frac{d}{dt}E'_q = \frac{1}{T'_{do}}(E_{fd} - E'_q - (X_d - X'_d)(-i_d))$$

$$\frac{d}{dt}E'_d = \frac{1}{T'_{qo}}((X_q - X'_q)i_q + E'_d)$$

Modelo de la red.

La red de transmisión es usualmente representada por sus parámetros concentrados “equivalente π ”. El comportamiento de la red es descrito por la ecuación matricial.

$$I = Y_{bus} V$$

La estabilidad de los sistemas eléctricos esta relacionada con la habilidad de un sistema de poder mantener valores aceptables en todo el sistema bajo condiciones normales y después de haber controlado o arreglado la perturbación.

Para evitar esto es necesario utilizar elementos adicionales que contribuyan en el buen desempeño del sistema, como son reguladores de voltaje, estabilizadores y gobernadores.

Modelo del control de voltaje y estabilizador

Para el modelo del control de voltaje se considera un sistema de excitación de tiristores con un estabilizador de sistemas de potencia como se muestra en la fig.

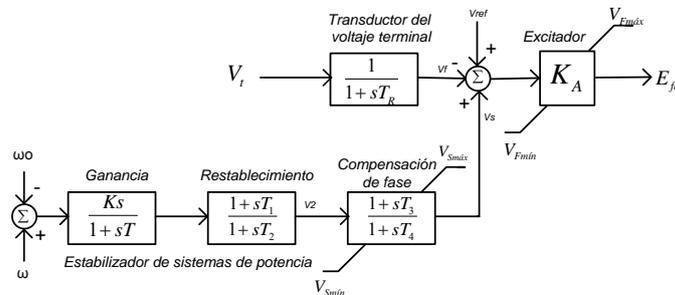


Fig. . Control de voltaje y del PSS.

En el sistema de excitación se utiliza una ganancia alta, sin retroalimentación derivada o reducción de la ganancia transitoria. T_R representa la constante de tiempo del transductor del voltaje terminal. La única no linealidad asociada con el sistema de excitación son los límites del voltaje de salida representados por V_{Fmax} y V_{Fmin} .

La representación del estabilizador de sistemas de potencia consiste de tres bloques:

Un bloque de compensación de fase, un bloque de restablecimiento y un bloque de ganancia.

El bloque de Compensación de fase provee la característica apropiada de adelanto de fase para compensar el atraso de fase entre la entrada al excitador y el par eléctrico en el entrehierro del generador.

El bloque de restablecimiento sirve como un filtro pasa altos, con la constante de tiempo T_1 y T_2 lo suficientemente grande para permitir que las señales asociadas con oscilaciones de T_1 pasen sin alteraciones. Sin este bloque, cambios estacionarios en la velocidad modificarían el voltaje en terminales.

En la aproximación considerada en este trabajo, la línea de transmisión se representa mediante un circuito RL despreciando el efecto capacitivo en las líneas de transmisión aéreas mostrado en la fig. .

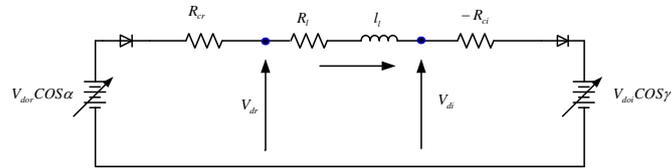


Fig. . Diagrama unifilar del enlace de HVDC.

En este modelo la I_d en el enlace de CD se considera una variable de estado y su comportamiento dinámico está definido por la ecuación, los parámetros se muestran en el apéndice A.

$$\frac{d}{dt} I_{cd} = \frac{1}{L} (V_{cdr} - V_{cdi} - R_{cd} I_{cd})$$

Modelo del control de HVDC.

En las fig. podemos ver los diagramas a bloques de los controles de la línea de CD utilizados en este trabajo. El cual comprende un control proporcional-integral (PI) operando bajo el principio de corriente constante en el rectificador y en el inversor el voltaje se mantiene constante a través del control del ángulo de extinción.

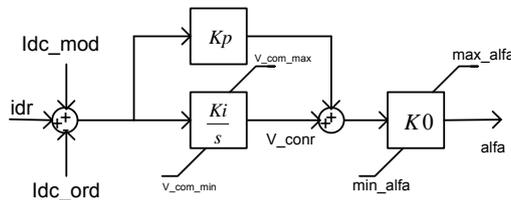


Fig. Diagrama de control del rectificador.

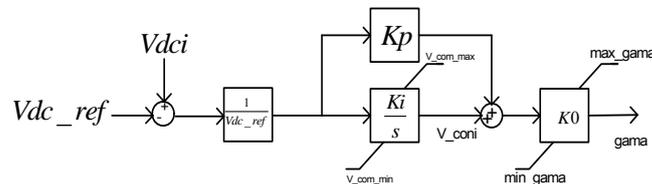


Fig.. Diagrama de control del inversor.

De donde se obtiene la representación de interés. Las ecuaciones de los ángulos de disparo y extinción se calculan de forma algebraica.

De los modelos antes mencionados se obtiene un sistema de ecuaciones de la siguiente forma:

$$\dot{X} = Ax + f(x) + Bu$$

Linealizando por medio de series de Taylor, se obtiene el sistema de interés para estudio de análisis modal ecuación.

Otra forma de obtener la matriz de estado puede hacerse directamente de un modelo de simulación no lineal por perturbaciones en cada estado en turno por pequeñas cantidades y encontrando la relación correspondiente de cambio en todos los estados, esta relación dividida por la perturbación da la columna de la matriz de estado correspondiente al estado perturbado. Esta técnica es satisfactoria si las no linealidades del sistema se evitan (las perturbaciones deben ser pequeñas) y requieren al menos cálculos de doble precisión (operación normal en MATLAB).

RESULTADOS

La cuatro **metas** planteadas en este proyecto (1, 2, 3 y4) se cumplieron y se muestran con los estudios realizados de la aplicación y puesta en servicio del paquete computacional en MATLAB propuesto, a continuación se muestran dichos resultados obtenidos:

Metas 1y2

La solución del sistema de dos maquinas cuatro nodos incorporando el enlace de HVDC en estado estable, se realizó con el paquete en MATLAB.

En la figura se observa el diagrama incorporando el enlace de HVDC.

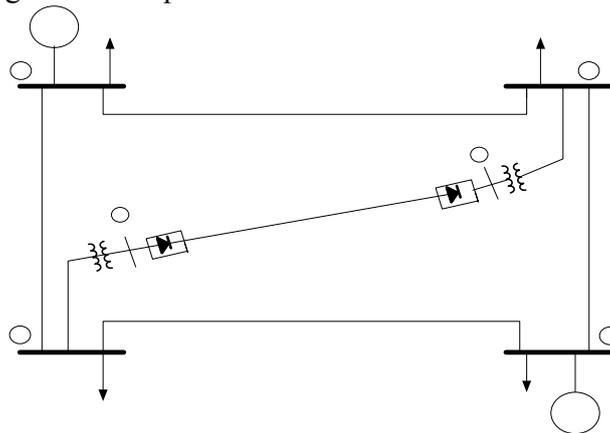


Fig. Sistema de dos maquinas cuatro nodos, incluyendo el enlace de HVDC.

En la tabla I y II se presentan los datos completos del sistema de CA y el enlace de HVDC respectivamente, que se utilizaron para la solución.

TABLA I
DATOS DE ENTRADA DE FLUJOS DE POTENCIA DEL SISTEMA DE CA.

Nodo N ₀	Voltaje (p.u.)	Angulo grados	P _G (MW)	Q _G (MW)	P _C (MW)	Q _C (MW)
1	1.00	0.0	0.000	0.00	50.00	30.990
2	1.00	0.0	0.000	0.00	170.0	105.35
3	1.00	0.0	0.000	0.00	200.0	123.94
4	1.02	0.0	318.0	0.00	80.00	49.58

GI

TABLA II
CARACTERISTICAS DE LA LÍNEA DE CD.

	Rectificador	Inversor
Número de nodo	5	6
Voltaje de CD	3.1416 (Ω)	3.1416 (Ω)
Reactancia de conmutación	4	4
Numero de puentes en serie	$\alpha_{\min} = 5^\circ$	$\gamma_{\min} = 18^\circ$
Ángulos de control mínimo	20 Ω	
Resistencia de la línea CD	100 MW	
Potencia de la línea de CD	500kV	
Voltaje de CD		

En las tablas III y IV muestra los resultados de flujos de potencia del sistema de CA/CD.

TABLA III
RESULTADOS DE FLUJOS DE POTENCIA DEL SISTEMA DE CA-CD.

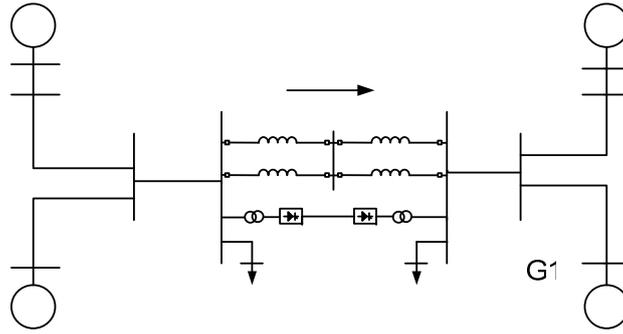
Bus No.	Voltaje (p.u.)	Ángulo (grados)	P_G (p.u.)	Q_G (p.u.)	P_C (p.u.)	Q_C (p.u.)
1	1.00000	0.0000	1.901	1.561	0.5000	0.3099
2	0.9787	0.7	0.0000	0.000	1.7000	1.0535
3	0.9568	-3.0	0.0000	0.000	2.0000	1.2394
4	1.02000	2.1	3.1800	2.129	0.8000	0.4958

TABLA IV
RESULTADOS DEL ENLACE DE CD.

	Rectificador	Inversor
Número de nodo	5	6
Ángulos de control	$\alpha_{\min} = 5.85^\circ$	$\gamma_{\min} = 18^\circ$
Potencia real de CD	100.7 (MW)	100.0 (MW)
Potencia reactiva de CD	21.7 (MVar)	38.4 (MVar)
Voltaje de CD	503.6 (kV)	500.6 (kV)
Corriente CD	1 (kA)	1 (kA)

Metas 3y4

El sistema para el análisis de estabilidad angular ante pequeños disturbios es el representado en la fig. al cual se efectuaron diversas pruebas. Tomando en cuenta las ecuaciones diferenciales del enlace, con las mismas consideraciones de la maquina y la red utilizadas en el estudio de corriente alterna. El diagrama unifilar del sistema es el siguiente.



Área 1

Fig. Diagrama unifilar del sistema de dos áreas.

Las reactancias de la red se muestran en La Fig. están en pu con una base de 100 MVA-20 kV, 60 Hz (referidas al lado BT de los transformadores).

TABLA V
LA ESTABILIDAD ANTE PEQUEÑOS DISTURBIOS CONSIDERANDO LOS MODELOS DE GENERADOR CLÁSICO.

Modos	Eigenvalores		Amortiguamiento	Frecuencia	Participación dominante	
	σ	ω			Estado	Generador
1	0.0	$\pm 3.5324i$	0.0	0.5486	δ, ω	4
2	0.0	$\pm 7.4194i$	0.0	1.6543	δ, ω	3
3	0.0	$\pm 7.7135i$	0.0	1.2163	δ, ω	2

G2

Carga 1

En la tabla VI se puede ver el comportamiento del sistema con la influencia del sistema del HVDC el cual mejora la característica de estabilidad del modo interárea.

TABLA VI
INFLUENCIA DEL ENLACE DE HVDC EN LA ESTABILIDAD ANTE PEQUEÑOS DISTURBIOS CONSIDERANDO LOS MODELOS DE GENERADOR CLÁSICO.

Modos	Eigenvalores		Amortiguamiento	Frecuencia	Participación dominante	
	σ	ω			Estado	Generador
1	-0.0180	$\pm 3.6212i$	0.00497	0.5763	δ	3
2	-0.0021	$\pm 7.4264i$	0.0002828	1.1819	δ	2
3	-0.0002	$\pm 7.7137i$	0.000026	1.2276	ω	4

TABLAN VII
INFLUENCIA DEL ENLACE DE HVDC EN LA ESTABILIDAD ANTE PEQUEÑOS DISTURBIOS CONSIDERANDO LOS MODELOS TRANSITORIOS DE GENERADOR, SISTEMA DE EXCITACIÓN, PSS, Y GOBERNADOR TURBINA.

Modos	Eigenvalores		Amortiguamiento	Frecuencia	Participación dominante	
	σ	ω			Estado	Generador
1	- 1.2189	± 4.0664	0.28714	0.64718	δ	3
2	- 6.284	± 6.6056	0.68925	1.0513	δ	2 y 3
3	- 7.676	± 7.7654	0.703	1.2359	E'_q	2

CONCLUSIONES

En este proyecto se presenta un estudio de flujos de potencia CA/CD incorporando un enlace de CD, como herramienta de solución utilizamos el programa en MATLAB. Observamos que la potencia real es más fácil controlar que con la línea de CA, como se muestra en las tablas, presenta mayor consumo de reactivos en los nodos 2 y 3, se puede ver mayor caída de tensión en el nodo 2 que es el nodo del inversor debido al alto consumo de reactivos de ese convertidor. Una solución práctica para este problema es utilizar compensación.

Es este proyecto la investigación fundamental es mostrar la contribución al amortiguamiento del enlace de HVDC en un sistema interconectado de dos áreas, se obtiene que los modos en el sistema con modelo clásico de máquina son amortiguados y de forma importante en la oscilación interárea

Aplicando controles a la máquina se observa que la mayor influencia se da en los tres tipos de modos pero con una contribución mayor en los modos locales.

Impacto.

El desarrollo de este proyecto da las bases para entender el modelado de Sistemas Eléctricos de Potencia (SEP) que incluyen líneas de corriente directa (HVDC) y así poder hacer el análisis en estado estacionario y poder hacer la formulación del análisis ante pequeños disturbios de sistemas equivalentes máquina bus infinito ó sistemas interconectados de gran tamaño, como es el caso de la red eléctrica nacional (CFE). Esto implica un impacto en el conocimiento del grupo de investigación.

Este proyecto nos da las bases principales para poder determinar el estudio en estado estacionario y dinámico de SEP's y proponerlo como un proyecto más ambicioso con la industria nacional, ya que como se mencionó al principio es una área que se debe investigar.

Así que el impacto es muy importante para la formación de recursos humanos de alto nivel que puedan entender los procesos de modelación y hacer análisis en estado estacionario y dinámico de SEP ante cualquier tipo de disturbio. El material obtenido en este proyecto además sirve como herramienta para el curso de estabilidad de sistemas eléctricos de potencia que imparto en el departamento de ingeniería eléctrica de la sepi ESIME ZAC.

Lo mas importante es que se trabajó con alumnos que entendieron esta metodología y parte les ayudo para sus trabajos de tesis en una forma indirecta, otros alumnos seguirán este tipo de proyectos ya sea como alumnos PIFI y tesistas.