

See discussions, stats, and author profiles for this publication at: <https://www.researchgate.net/publication/28211495>

# Modelo de un TCSC en Matlab–Simulink para estudios de oscilaciones de potencia

## ARTICLE

Source: OAI

---

CITATION

1

---

READS

82

## 4 AUTHORS, INCLUDING:



[Jorge W. González](#)

Universidad Pontificia Bolivariana

29 PUBLICATIONS 33 CITATIONS

[SEE PROFILE](#)



[Idi Isaac](#)

Universidad Pontificia Bolivariana

25 PUBLICATIONS 33 CITATIONS

[SEE PROFILE](#)



[Gabriel J. López](#)

Universidad Pontificia Bolivariana

28 PUBLICATIONS 28 CITATIONS

[SEE PROFILE](#)

## MODELO DE UN TCSC EN MATLAB-SIMULINK PARA ESTUDIOS DE OSCILACIONES DE POTENCIA

J. W. Gonzalez\*<sup>†</sup>, H. A. Cardona\*, I. A. Isaac\*, G. J. Lopez\*

\*Universidad Pontificia Bolivariana, Cq. 1 #70-01, of. 11-261, Medellín, Colombia,

Recibido 9 Noviembre 2007; aceptado 18 Diciembre 2007  
Disponible en línea: 27 Diciembre 2007

Resumen: Se presenta un modelo para un TCSC (*Thyristor Controlled Series Compensator*) desarrollado en Matlab © - Simulink, útil para estudios de estabilidad y de estado estable. Se realiza un especial énfasis en el diseño del sistema de control para aplicaciones prácticas de amortiguamiento de oscilaciones de potencia. Finalmente, la capacidad amortiguadora del TCSC es efectivamente comprobada mediante el modelo desarrollado, para un sistema práctico con problemas de oscilaciones de potencia.

Copyright © 2007 UPB

Abstract: A model for a TCSC (Thyristor Controlled Series Compensator) developed in Matlab© - Simulink, aimed for steady state and stability studies is presented. A special concern in the design of the control system is achieved for real applications of power swings damping. Finally, the damping strength of the TCSC is effectively proved using the developed model, for a practical system with power swings issues.

Keywords: FACTS, TCSC, modeling, simulation, power swings.

### 1. INTRODUCCIÓN

Puede decirse que hoy día la consigna de planeación de un sistema de transmisión no debe limitarse únicamente a soluciones basadas en nuevas líneas de transmisión o nuevas centrales eléctricas, sino más bien en la optimización del uso de los recursos existentes. Para alcanzar este objetivo, se requiere de equipos flexibles que se adapten a cada necesidad. Los FACTS (*Flexible AC Transmission Systems*) han resultado ser una alternativa alentadora de solución.

Un tipo de FACTS, conocido como el TCSC (*Thyristor Controlled Series Capacitor*)

([Hingorani y Gyugyi, 2000](#)), es el paso siguiente a la compensación capacitiva serie, donde al conjugarse un reactor maniobrado con electrónica de potencia se logra obtener una impedancia capacitiva variable en el tiempo. Los beneficios se ven reflejados en un control continuo de la potencia transferida a través de líneas de transmisión, respuestas dinámicas tendientes a la mejora de la estabilidad de las redes, programación de flujos de potencia en los corredores de líneas y en general una cantidad de provechos particulares dependiendo de la ubicación del dispositivo en el sistema de potencia.

Para lograr los beneficios mencionados, es

---

<sup>†</sup> Autor correspondiente. Tel. (+574) 4159015 ext 9586, fax 4118779.  
E-mail: [jorgew.gonzalez@upb.edu.co](mailto:jorgew.gonzalez@upb.edu.co) (J. W. González).

necesario disponer de modelos de simulación digital de dispositivos FACTS.

Si se dispone de dichos modelos, en un futuro cercano, el personal de planeamiento podría incluir los FACTS en las alternativas de solución basadas en nuevas tecnologías y buscadas por la Unidad de Planeación Minero Energética de Colombia, UPME, mediante los planes de expansión del Sistema de Transmisión Nacional, STN.

La realidad actual es que los pocos modelos desarrollados en el ámbito internacional se encuentran completamente restringidos como propiedad de las empresas o sus investigadores. Incluso, no se tiene registro de tales modelos para los programas de simulación empleados por las empresas de energía Colombianas. En esto radica la importancia de desarrollar modelos para FACTS como el TCSC que no solo sirva a la industria sino también a la comunidad investigativa. La idea, una vez construido el modelo, es validarlo en cuanto a su operación en sistemas reducidos, pero estándar, utilizando herramientas de programación y proponerlo así para formar parte de los programas empleados por las empresas de energía.

Un modelo debe poseer las características para aplicación en estudios de planeamiento. Proyectos futuros deberán cuantificar la viabilidad económica a partir de los provechos obtenidos con el TCSC.

Algunos autores ya han iniciado con el desarrollo de modelos para TCSC. En la referencia ([Wak-Guhn, 1997](#)) se presenta un análisis de características transitorias y de estado estable usando ecuaciones analíticas para describir los tres modos básicos de operación de un TCSC. La referencia ([Jovcic, 2005](#)) trata de un modelo analítico, lineal en espacio de estados. La referencia ([Majan, 2006](#)) desarrolla un modelo matemático y función de transferencia del TCSC que podría utilizarse en estudios de estabilidad. La referencia ([Fuerte-Esquivel, 2000](#)) presenta un modelo de TCSC para estudios de flujo de cargas con buen nivel de detalle para dicha aplicación.

Sin embargo, ninguna de las referencias mencionadas presenta un modelo y pruebas detalladas del TCSC para aplicaciones de amortiguamiento de oscilaciones de potencia. La aplicación preferida fue en torno a sintonización de módulos funcionales del TCSC y de control del flujo de potencia activa. Los estudios de las

referencias fueron concentrados, principalmente, en el modelo básico de un generador conectado a un sistema de capacidad infinita a través de un TCSC.

El presente trabajo entrega en detalle los aspectos de diseño de un modelo del TCSC en Matlab © - Simulink y comprueba su efectividad mediante una simulación compuesta por un sistema de dos generadores interconectados a través de una línea de transmisión a 500 kV.

## 2. BENEFICIOS DEL TCSC

El TCSC es un dispositivo FACTS relativamente económico debido a su conexión serie con las líneas de transmisión (no requiere transformadores). Desde el punto de vista técnico presenta beneficios muy atractivos para un sistema de transmisión ([Hingorani y Gyugyi, 2000](#); [González, 2003](#)):

- En sistemas enmallados, los TCSC permiten el control de la corriente de línea y el flujo de potencia a través de ella. Balancean circuitos.

- El TCSC controla dinámicamente el flujo de potencia a través de una línea, permitiendo así, el aumento de la estabilidad transitoria y el amortiguamiento de las oscilaciones de potencia de baja frecuencia (entre 0.1-3Hz).

- Se ha demostrado en la práctica que el TCSC es una de las alternativas más económicas para incrementar la transmisión de potencia de manera segura. En casos reales, el costo del TCSC ha resultado ser inferior a la mitad del costo de un SVC (*Static Var Compensator*) o de una nueva línea de transmisión.

- No contribuye a las oscilaciones subsíncronas. De este modo se pueden tener mayores niveles de compensación (frente a los que se logra con compensación serie tradicional).

- Cuando se presenten fallas en las líneas con TCSCs, los tiristores pueden conectar el reactor en bypass con el condensador (como se verá más adelante en los modos de operación) y de este modo se puede disminuir la corriente de falla.

- Su topología circuital es muy simple. El condensador va conectado directamente en serie con la línea y el Reactor Controlado por Tiristores (TCR) va montado en paralelo con el condensador.

- En la actualidad se tienen en el mundo varias instalaciones de TCSC's en operación (lo cual contribuye a hacerlos muy confiables).

### 3. TOPOLOGÍA DEL TCSC

En la [Fig. 1](#) aparece el esquema básico de un TCSC. Está conformado por dos condensadores serie; uno de éstos va en paralelo con un Reactor Controlado por Tiristores (TCR). En paralelo con cada condensador se tiene un Varistor de Óxido de Metal (MOV) para protegerlos contra sobretensiones transitorias. Además, al igual que los condensadores serie fijos, cada módulo del TCSC posee un interruptor mecánico en paralelo para deshabilitarlo en caso de falla interna.

La [Fig. 1](#), muestra además que el circuito completo del TCSC posee tres seccionadores, uno ubicado en serie con la línea de transmisión que se abre para acoplar el TCSC a la línea (en serie con ésta) y dos ubicados en sus extremos, cuyo fin es desacoplar el TCSC en caso de falla o mantenimiento.

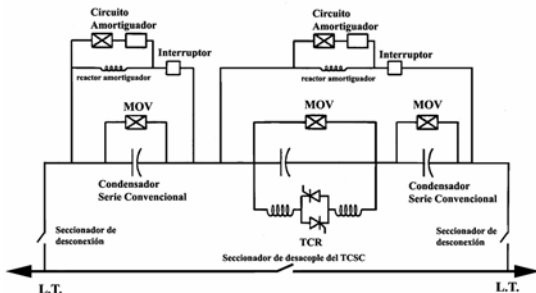


Fig. 1. Diagrama unifilar del TCSC.

Como se puede apreciar, la compensación serie variable de una línea de transmisión no se hace totalmente con compensación variable (debido a los costos), sino que se descompone en dos partes: una fija y otra variable. La parte variable (TCSC) es más costosa que la parte fija debido a los implementos adicionales que posee.

### 4. MODOS DE OPERACIÓN DEL TCSC

Con el TCSC se busca obtener un condensador variable de forma continua por medio de una cancelación parcial de la capacitancia efectiva de compensación utilizando un TCR. El TCR corresponde a una impedancia inductiva variable de forma continua, controlada por el ángulo de disparo  $\alpha$ ; por lo cual, la impedancia equivalente para el TCSC en estado estable corresponde a un circuito LC. En dicho circuito se encuentran en paralelo una impedancia capacitiva fija  $X_C$  y una impedancia variable inductiva  $X_L(\alpha)$ .

Según el valor del ángulo  $\alpha$  que controla la impedancia inductiva  $X_L(\alpha)$ , el TCSC puede presentar tres modos básicos de operación: bloqueo, bypass y vernier.

#### 4.1 Modo Bloqueo

La [Fig. 2](#) ilustra el modo bloqueo de operación. En dicho modo los tiristores no conducen ya que no se generan pulsos de disparo para la compuerta, por lo cual el TCSC se comporta como un banco de condensadores serie fijo.

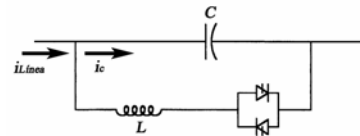


Fig. 2. Modo Bloqueo

#### 4.2 Modo Bypass

La [Fig. 3](#) muestra como es el funcionamiento de este modo de operación. En este modo se generan pulsos continuos de disparo para las compuertas de los tiristores, lo que permite que éstos conduzcan permanentemente durante el semiciclo de la onda de tensión en el condensador. La conducción continua de los tiristores hace que predomine el efecto del TCR (reactancia menor) sobre el del condensador, generándose un efecto neto de una pequeña reactancia inductiva. En este modo de operación la mayoría de la corriente de línea circula a través del TCR.

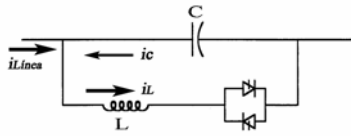


Fig. 3 Modo Bypass

Es importante distinguir entre los dos posibles modos bypass que posee el TCSC. En uno se conmuta el interruptor mecánico en paralelo con el condensador, para deshabilitar el TCSC según alguna necesidad (como es el caso de una falla interna). El otro emplea tiristores como lo descrito en el párrafo anterior y es empleado para muchas secuencias de protección como por ejemplo la protección del MOV, limitación de cortocircuitos en la línea de transmisión, etc.

#### 4.3 Modo Vernier

En este modo, las válvulas operan con un control en el ángulo de disparo y como consecuencia los tiristores conducen parcialmente durante un intervalo del ciclo de la onda de tensión. Por medio del control del ángulo de disparo, es posible controlar efectivamente la corriente fundamental que fluye a través de los tiristores (TCR). Dependiendo de la magnitud de dicha corriente, el TCSC puede presentar una reactancia aparente neta inductiva o capacitiva.

En este modo de operación, el TCSC puede incrementar la tensión de compensación por encima del valor que produciría el banco de condensadores por sí solo. En otras palabras, el TCSC permite aumentar la impedancia nominal efectiva del condensador o del reactor de compensación serie, ya que el valor de la impedancia aparente es directamente proporcional a la tensión. Esto se debe a una realimentación de corriente que se da en el condensador cuando ocurre el disparo de los tiristores, lo que ocasiona que el voltaje del condensador presente un nivel de CD. Este efecto es llamado *CD offset*.

## 5. MODELO DEL TCSC

### 5.1. Generalidades

Cuando se realiza la modelación de un dispositivo, es necesario tener en cuenta que el

nivel de detalle del modelo debe corresponder al tipo de programa utilizado en la simulación y al tipo de estudio que se desee realizar (Tenorio, 1995; Tenorio 1996). Por ejemplo, si el objetivo es llevar a cabo un análisis de transitorios electromagnéticos en alta frecuencia para un sistema con un TCSC, el modelo a utilizar debe ser muy detallado y además del sistema de control debe incluir el esquema de generación de pulsos de disparo. Por otro lado, si el objetivo es llevar a cabo un estudio de flujo de cargas, el modelo puede ser muy simple y estar conformado solamente por una reactancia capacitiva controlada de forma variable.

Los programas de estabilidad estudian las características dinámicas de los sistemas de potencia durante cierto intervalo de tiempo. Debido a esto, es necesario tener un modelo del TCSC que describa su funcionamiento dinámico para que pueda ser incorporado a este tipo de simulación. Para lograr esto, el modelo debe variar la impedancia de la línea donde se ubicará el TCSC en la simulación. Sin embargo, como el objetivo principal del TCSC es variar la impedancia para mantener ciertas variables del sistema en un valor o rango determinado, se le debe incorporar al modelo un control apropiado que genere las variaciones en la impedancia del TCSC de acuerdo con las necesidades del sistema.

### 5.2. Estructura de Control

La estructura del control depende del objetivo de la aplicación del TCSC. Este control puede ser usado para tres propósitos principales: control del flujo de potencia, amortiguamiento de las oscilaciones de potencia o para la eliminación de la resonancia subsíncrona (SSR). La diferencia más notable entre estas tres aplicaciones, es la estructura de control usada y las especificaciones del equipo. A continuación se describe la función general que debe realizar el control según la aplicación del TCSC. Ver además la Fig. 4.

#### 5.2.1. Control del flujo de potencia

Es el control principal y su función es mantener en un valor determinado el flujo de potencia en la línea. Para esto, la potencia requerida en la línea ( $P_{ref}$ ) es comparada con la potencia de la línea

( $P_{línea}$ ) y el error entra a un controlador que proporciona un valor de impedancia para el TCSC, de tal forma que la potencia de la línea se aproxime al valor dado por  $P_{ref}$ .

#### 5.2.2. Control de oscilaciones de potencia

Este control aumenta el amortiguamiento de las oscilaciones electromecánicas presentes dentro del sistema. Esta función puede ser llevada a cabo mediante un lazo de control que suministre el valor de impedancia necesaria para que el TCSC logre el amortiguamiento requerido. Para lograr esto, se debe tener una señal de entrada que sea sensible a las oscilaciones de potencia para ser desfasada y amplificada de tal forma que produzca el amortiguamiento deseado. Dicha señal puede ser local o remota.

#### 5.2.3. Control para la eliminación de la SSR

Este control se emplea en líneas con altas posibilidades de presentar SSR, por ejemplo, las líneas con alta compensación serie cercanas a plantas de generación térmica. Su objetivo es permitir el aumento seguro de la compensación serie, eliminando el riesgo de resonancia subsíncrona.

#### 5.2.4. Control de estabilidad transitoria

Este no es un control realimentado como los anteriores, ya que se compone de funciones discretas que realiza el TCSC cuando se presenta un disturbio grave en el sistema para evitar que pierda la estabilidad. Una de dichas funciones podría ser la generación de la máxima compensación capacitiva posible (máxima reactancia capacitiva), para incrementar la transmisión de potencia en caso de que se presente una falla en una línea paralela.

#### 5.3. Variación de la impedancia de la línea

Un aspecto importante que hay que tener en cuenta en el modelo del TCSC para este tipo de estudios, es la manera como el controlador va a variar la impedancia de línea en el programa de

simulación. Es decir, cómo se va a representar la parte del TCSC que se conecta a la línea (circuito de potencia) y cómo es su respectivo control interno.

La variación de la impedancia de línea con el TCSC se puede llevar a cabo de cualquiera de las siguientes formas:

- Directamente, variando el valor de la impedancia de la línea o por medio de una “caja negra” conectada en la línea, que represente una impedancia variable, con un rango de operación capacitivo y otro inductivo.
- Por un condensador convencional fijo en paralelo con inyecciones de corriente en las barras de los dos extremos donde va conectado, que representan la corriente variable del TCR.

#### 5.4. Diagrama de bloques del modelo

El diagrama de bloques del modelo del TCSC desarrollado y posteriormente implementado en Matlab© - Simulink, aparece en la [Fig. 4](#). Este modelo está compuesto por un bloque de amortiguamiento de oscilaciones de potencia del cual sale una reactancia modulada  $X_{mod}$ , un bloque para el control del flujo de potencia con una reactancia de estado estable  $X_{ee}$  como salida, y una entrada auxiliar para el control de la estabilidad transitoria, la cual representaría órdenes discretas sobre el TCSC para operar en caso de falla en una línea.

El modelo de la [Fig. 4](#), incluye también un retardador de primer orden que representa el retardo asociado a los controles de disparo y a la respuesta natural del TCSC. Dicho bloque posee además unos límites para el valor de la impedancia, los cuales representan los límites operativos del TCSC.

Este modelo cuenta además con un bloque selector de modos de operación para proteger el TCSC en caso de falla, el cual recibe señales indicadoras de falla en la línea de otro bloque creado para tal fin.



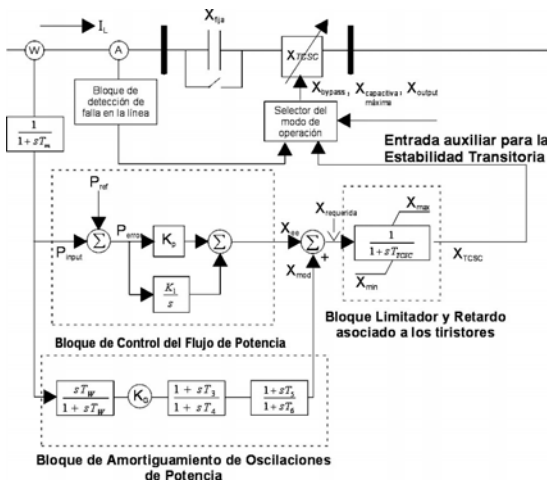


Fig. 4. Modelo del TCSC para estudios de estabilidad

### 5.5. Explicación de la estructura del control de amortiguamiento de oscilaciones de potencia

El Bloque de amortiguamiento de las oscilaciones de potencia posee un control más complejo que se detallará a continuación.

La señal ideal para utilizar en el control para amortiguamiento de oscilaciones de potencia es la velocidad del eje de la turbina del generador, cuya oscilación se quiere amortiguar ya que esta señal se encuentra en fase con el torque de amortiguamiento. En la práctica existen múltiples inconvenientes que no permiten que esta señal se tome como entrada, entre los cuales se destacan:

- El cambio de velocidad se debe medir en los propios generadores que estén oscilando. Por lo general estos generadores se encuentran muy alejados del punto donde está ubicado el TCSC.
- El cambio de velocidad que se debe tomar para la señal de amortiguamiento es la diferencia de velocidades de los generadores que están presentando el modo de oscilación. Para calcular la diferencia de velocidades, estas dos señales deben estar sincronizadas entre sí y para lograrlo, se debe emplear una señal satelital que las sincronice.
- La velocidad medida en el eje del rotor no es muy exacta. La causa es que en cada punto del eje de los rotores se presentan diferentes velocidades por los torques de torsión que se

presentan a lo largo del eje.

Debido a lo anterior, en la práctica se acostumbra usar un bloque para amortiguamiento de las oscilaciones de potencia que emplee como señal de entrada la potencia activa de la línea. Esta señal se puede medir fácilmente, con alta exactitud, y es sensible a las oscilaciones de potencia en la línea.

El control para el amortiguamiento de las oscilaciones -basado en control convencional- toma la señal de potencia como señal de entrada, compensa el retardo de esta señal debido a los sistemas de medida y al retardo inherente en el TCSC (control del ángulo de disparo, disparo de los tiristores, etc.), la desfasa para adaptarla al cambio de velocidad y la amplifica.

En la Fig. 5 se aprecia un bloque para el amortiguamiento de las oscilaciones basado en redes del tipo adelanto/atraso. Este bloque posee tres elementos constituyentes: un filtro de reposición, una red de adelanto y la ganancia con la que se define el aporte de amortiguamiento del estabilizador. A continuación se explicará con más detalle cada elemento de este estabilizador.

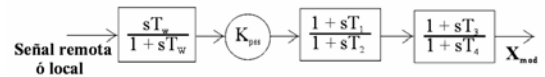


Fig. 5 Control auxiliar para el amortiguamiento de las oscilaciones de potencia

#### 5.5.1. Filtro de reposición (washout)

El filtro washout es un filtro pasa-altas y es el encargado de remover las señales de CD, de tal manera que sólo debe activarse cuando comiencen a presentarse las oscilaciones de baja frecuencia y desactivarse cuando ellas desaparezcan. En caso de no emplearse, la impedancia del TCSC se modificaría como una función de un cambio estacionario en la potencia transmitida. Es decir, el TCSC se opondría a cualquier cambio en la potencia incluyendo un cambio debido a un redespacho. La siguiente es la función de transferencia del filtro washout:

$$G_w = \frac{S * T_w}{S * T_w + 1} \quad (1)$$

Para que atenúe considerablemente las señales

de muy baja frecuencia y no oponga restricción a las señales de frecuencias entre 0.1Hz-3Hz, que corresponden al rango típico de frecuencias de oscilación en un sistema de potencia, en (1) la constante de tiempo  $T_W$  debe estar en el rango entre 1 y 20 segundos.

La Fig. 6, muestra el diagrama de Bode de la función de transferencia del filtro washout para una constante  $T_W$  de 10 s.

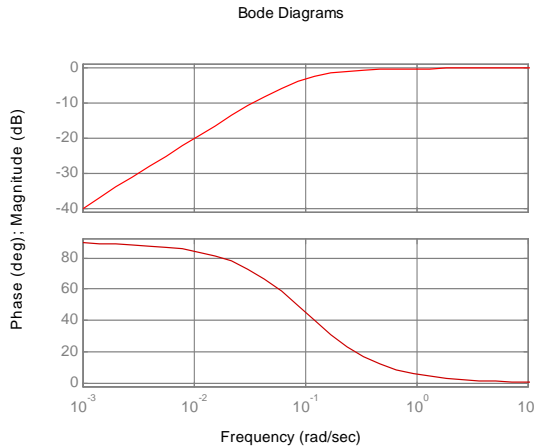


Fig. 6 Diagrama de Bode del filtro washout

### 5.5.2. Redes de adelanto

Para poder emplear la potencia eléctrica como señal para el amortiguamiento de las oscilaciones de potencia, se debe adelantar su fase un determinado valor (60 grados como valor recomendado). Esto se hace para que además de la componente de potencia en fase con la velocidad, es decir, la que genera el torque de amortiguamiento, se tenga una componente considerable en fase con el ángulo par de manera que se genere el torque sincronizante. Dicho desfase se genera con las redes de adelanto.

La función de transferencia de una red de adelanto es la siguiente:

$$G_A = K \frac{s + \frac{1}{T}}{s + \frac{1}{\alpha T}} \quad (0 < \alpha < 1) \quad (2)$$

En la Fig. 7 aparece el diagrama de Bode para una red de adelanto.

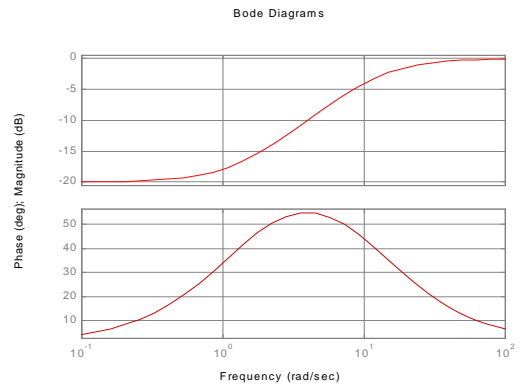


Fig. 7 Diagrama de Bode para una red de adelanto

### 5.5.3. Ganancia del estabilizador

La función de la ganancia en el estabilizador es amplificar la señal sensible a las oscilaciones de potencia de tal manera que pueda ser utilizada para amortiguar las oscilaciones que presentan un bajo nivel de amortiguamiento. Esta ganancia también debe compensar las atenuaciones que sufre la señal al pasar a través de las redes de adelanto y del filtro washout.

La ganancia deseada del estabilizador puede tomar como base el valor de la ganancia que produce inestabilidad. Este valor puede obtenerse mediante pruebas de campo llamadas comúnmente pruebas de margen de ganancia.

Estas pruebas consisten en incrementar lentamente la ganancia del estabilizador hasta que se observe alguna inestabilidad. Esta última es caracterizada por oscilaciones crecientes a frecuencias mayores que las del modo de oscilación a amortiguar (modo interárea). Es necesario buscar señales que sean muy sensibles al comienzo de la inestabilidad, por ejemplo, en el caso de los generadores las señales de salida del sistema de excitación son bastante sensibles. La idea es detectar el comienzo de inestabilidad y así desconectar de forma inmediata el estabilizador evitando que se produzca la inestabilidad. Se debe limitar además la salida del amortiguador para asegurar que la prueba se haga de forma confiable.

Una vez obtenido el valor de ganancia que produce inestabilidad, se recomienda ajustar el valor de la ganancia del estabilizador a un tercio de la ganancia crítica.



## 6. SIMULACIÓN

Para demostrar la capacidad de amortiguamiento del TCSC y verificar la adecuada operación del modelo, se llevó a cabo una simulación en Matlab© - Simulink para dos generadores interconectados por medio de una línea de transmisión a 500 kV. Ver Fig. 8. Para la modelación se utilizó un sistema correspondiente al penduleo de una máquina. La herramienta Simulink de Matlab© ya ha sido demostrada como eficiente y de buena precisión para modelos de sistemas de control en redes eléctricas (Wak-Guhn, 1997; Jovicic, 2005; Faruque, 2006).

Para llevar a cabo la simulación se trabajó con la ecuación de penduleo linealizada para el sistema de potencia de dos generadores. Se tienen las siguientes notas aclaratorias:

- En la simulación se asumió que la carga estaba conectada directamente al generador.
- Los transformadores a ambos extremos de la línea tienen una potencia nominal de 2500 MVA.
- La tensión base es 500 kV y la potencia base es 100 MVA.
- La  $X_{Total}$  incluye la reactancia transitoria de los generadores, la reactancia de los transformadores y de la línea, con un total de  $X_{total}=0.078312$  p.u.
- La línea de transmisión adicionalmente posee una compensación serie fija (C.F.) del 60%.

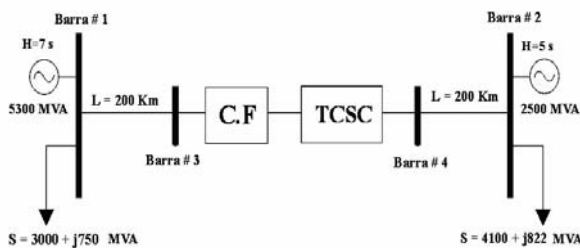


Fig. 8 Diagrama unifilar del sistema estudiado

### 6.1. Simulación sin el TCSC

Para la primera parte de la simulación no se utilizó el control de amortiguamiento de oscilaciones de potencia del TCSC. Se ejecutó el flujo de cargas para el sistema y los datos obtenidos se resumen en la Tabla 1.

Tabla 1. Datos obtenidos al correr el flujo de cargas sin el TCSC

V(gen1)	V(gen2)	P(gen1)	P(gen2)
1.02 p.u	1.01 p.u	5100 MW	2000 MW
Q(gen1)	Q(gen2)	Plínea	$\delta$
1536	1543	2100	39.5°
Mvar	Mvar	MW	

Para facilitar la representación del penduleo del sistema mediante diagramas de bloques, se halló una sola ecuación equivalente para todo el sistema a partir de las ecuaciones de penduleo para cada generador.

### 6.2. Simulación con el TCSC

Para simular el control del TCSC para amortiguar las oscilaciones de potencia, se seleccionó como señal de entrada la diferencia entre la velocidad angular de ambos generadores ( $\omega = \omega_1 - \omega_2$ ). Es importante aclarar que en la práctica, esto es difícil de implementar ya que este tipo de señales no están presentes en el sitio de la instalación del TCSC y se suelen utilizar preferiblemente señales de entrada locales como la corriente, la potencia, la tensión, etc.

El gran inconveniente que presenta la modelación del control del TCSC es que al variar la impedancia serie de la línea cambian las características eléctricas del sistema continuamente y por lo tanto el punto de operación de potencia eléctrica transmitida y ángulo  $\delta$  no permanece fijo. Por consiguiente, dentro del diagrama de bloques se implementó un algoritmo que calcula el flujo de cargas del sistema para cada valor de  $\Delta X_C$ . El algoritmo se encarga de correr el flujo de cargas con la variación en la reactancia serie ocasionada por el TCSC. Dicha reactancia es proporcional a la variación de la velocidad angular entre ambos generadores y está dada por  $\Delta X_C = K_C \Delta \omega$ , donde  $K_C$  es la ganancia del controlador del TCSC. Luego de la ejecución del flujo de cargas, se calculan las constantes de amortiguamiento y sincronización, conocidas típicamente como  $K_D$  y  $K_S$ .

Las curvas obtenidas para la variación del ángulo  $\delta$  vs tiempo sin el control del TCSC y con el control del TCSC aparecen en las Fig. 9 y 10.

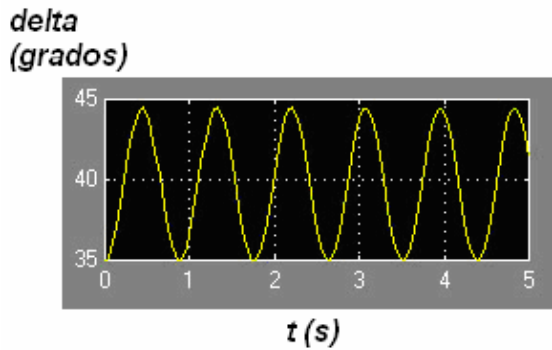


Fig. 9 Gráfica de  $\delta$  (grados) vs tiempo (segundos) sin control del TCSC para amortiguamiento de oscilaciones

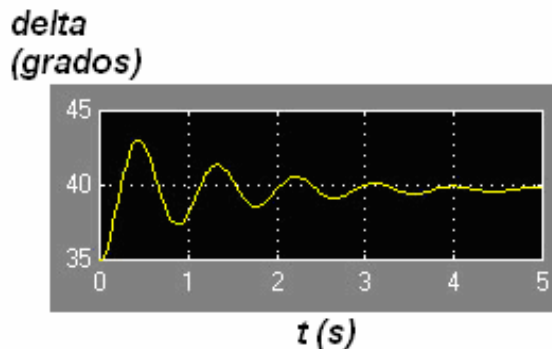


Fig. 10 Gráfica de  $\delta$  (grados) vs tiempo (segundos) con control del TCSC para amortiguamiento de oscilaciones

Con estos resultados se puede comprobar la efectividad del modelo implementado mediante Matlab© - Simulink para el TCSC en el modo de amortiguamiento de oscilaciones de potencia.

## 7. CONCLUSIONES

El diseño y análisis de sistemas complejos como los FACTS requieren recursos de simulación sencillos, precisos y confiables. El presente trabajo desarrolló un modelo para un TCSC con especial aplicación para el amortiguamiento de oscilaciones de potencia utilizando el programa Matlab©-Simulink. Dicho programa ha sido una vez más verificado como eficiente para modelar equipos de control de sistemas de potencia, gracias a los excelentes resultados del modelo obtenido.

El modelo desarrollado es simple y es útil para estudios de estabilidad de pequeña señal y flujo de cargas. El modelo actual es útil para estudiar

los potenciales del TCSC y cómo podrían ser sus alternativas y ventajas operativas para beneficio de Sistemas de Transmisión de energía eléctrica.

## AGRADECIMIENTO

Los autores agradecen las notables contribuciones de los ingenieros John P. Roso, Jorge Vásquez, Luis Giraldo y Ricardo Do Mattos Tenório.

## REFERENCIAS

- Faruque, M., Zhang, Y., Dinavahi, V., (2006). "Detailed Modeling of CIGRÉ HVDC Benchmark System Using PSCAD/EMTDC and PSB/SIMULINK," IEEE Trans. On Power Delivery, vol. 21, pp. 378-387.
- Fuerte-Esquivel, C., Acha, E., Ambriz-Pérez, H., (2000) "A Thyristor Controlled Series Compensator Model for the Power Flow Solution of Practical Power Networks," IEEE Trans. On Power Systems, vol. 15, pp. 58-64.
- González, J.W., (2003) "Estudio de los FACTS y aplicación en un plan de expansión del sistema de transmisión nacional Colombiano", MSc. Tesis, Universidad Pontificia Bolivariana, Medellín.
- Hingorani, N., Gyugyi, L., (2000). Understanding FACTS. New York: IEEE Press, 350p.
- Jovcic, D., Pillai, G., (2005) "Analytical Modeling of TCSC Dynamics," IEEE Trans. On Power Delivery, vol. 20, pp. 1097-1104.
- Mahajan, V., (2006) "Thyristor Controlled Series Compensator," IEEE International Conference on Industrial Technology, ICIT, pp. 182-187.
- Tenório, A.R.M., Jenkins, N., Bollen, M., (1995) "A TCSC model for electromagnetic transient studies" IEEE/KTH Stockholm Power Tech Conference, Stockholm, Sweden.
- Tenório, A.R.M. et al., (1996) "Controlled Series Compensation: digital program modelling and possible applications to the Brazilian System", Proceedings of the V SEPOPE, Recife, Brasil, pp 1-7.

Wak-Guhn, H., Jong-Keun, P., Byung-Ha, L., (1997) "Analysis of Thyristor Controlled Series Compensator Dynamics Using the State Variable Approach of a Periodic System Model," IEEE Trans. On Power Delivery, vol. 12, pp. 1744–1750.

## SOBRE LOS AUTORES

### **Jorge W. Gonzalez**

Ingeniero Electricista de la Univ. Nacional en 1992 y MSc - PhD. en 2003 y 2006 respectivamente de la Universidad Pontificia Bolivariana, Colombia, donde es Profesor Titular de tiempo completo e Investigador en la Facultad de IEE desde 1997. Trabajó ocho años para HVM Ingenieros. Ha trabajado para Siemens, Erlangen en la sección PTD (FACTS y HVDC). Es investigador invitado del Werner von Siemens laboratory en Univ. Kempten, Alemania y en el Power Systems Institute en Erlangen Univ. Alemania.

### **Hugo A. Cardona**

Ingeniero Electricista y MSc en 1999 y 2005 respectivamente de la Universidad Pontificia Bolivariana, Colombia, donde es Profesor Asociado de tiempo completo e Investigador en la Facultad de IEE desde 1999. Actualmente adelanta sus estudios de PhD en UPB con la asesoría de Univ. of Kempten, Alemania. Ha trabajado en multiples proyectos industriales.

### **Idi A. Isaac**

Ingeniero Electricista y MSc en 2000 y 2005 respectivamente de la Universidad Pontificia Bolivariana, Colombia, donde es Profesor Asociado de tiempo completo e Investigador en la Facultad de IEE desde 2000. Actualmente adelanta sus estudios de PhD en UPB con la asesoría de Univ. of Kempten, Alemania. Ha trabajado en multiples proyectos industriales.

### **Gabriel J. Lopez**

Ingeniero Electricista y MSc en 2002 y 2007 respectivamente de la Universidad Pontificia Bolivariana, Colombia, donde es Profesor Asistente de medio tiempo e Investigador en la Facultad de IEE desde 2004. Trabajó para HVM Ingenieros y actualmente es Consultor en Unión Eléctrica Ltda..