

IMPACTO DEL TCSC EN LA ESTABILIDAD DE PEQUEÑA SEÑAL EN UN SISTEMA MAQUINA SÍNCRONA-BARRAJE INFINITO

Impact of the TCSC in Small Signal Stability on a Single Machine-Infinite Busbar

Alfonso Álzate G¹., Christian Sepúlveda L²., Catalina González C³.
Ingeniería Eléctrica, Universidad Tecnológica de Pereira, Pereira, Colombia
 alalzate@utp.edu.co
 chrisdavid1205@utp.edu.co
 catalinagc@utp.edu.co

Resumen— En este artículo se analiza el impacto que produce conectar un capacitor serie controlado por tiristores (TCSC) en la estabilidad de pequeña señal en un sistema de potencia. El sistema se modela como una máquina síncrona conectada a un barraje infinito (SMIB: Single machine infinite bus). Se simula el sistema con y sin compensación para observar las diferencias que genera el conectar el TCSC al sistema. Se obtienen resultados para un modelo lineal y para un modelo no lineal bajo diferentes tipos de perturbaciones.

Palabras clave— Análisis de Pequeña Señal, Estabilidad, Modelo Heffron-Phillips, Modelo Lineal, Modelo no Lineal, SMIB, TCSC.

Abstract— This paper analyzes the effect of one thyristor controlled series capacitor (TCSC) in the small signal stability on power system. The system is modeled as a synchronous machine connected to an infinite bus (SMIB: Single Machine Infinite Bus). The system is simulated with and without compensation to observe the difference generated by connecting the TCSC. Results are obtained for a linear and non-linear model for different types of disturbances.

Key Word — Small Signal Analysis, Stability, Heffron-Phillips Model, Linear Model, Non-linear Model, SMIB, TCSC.

I. INTRODUCCIÓN

Durante los últimos años el uso de dispositivos FACTS (Flexible AC Transmission System) se ha incrementado, esto debido a la creciente demanda y a la implementación de energías alternativas, lo que ha causado problemas de estabilidad por oscilaciones de potencia [8] [9]. Estas

oscilaciones de potencia pueden ocurrir debido a fallas repentinas, transitorios o conexión / desconexión de cargas.

Una forma de analizar el problema de estabilidad debido a oscilaciones de potencia es a través de una máquina síncrona conectada a un barraje infinito (SMIB) a través del modelo de Heffron-Phillips.

Uno de los beneficios de los FACTS está relacionado con el mejoramiento de los márgenes de estabilidad y el amortiguamiento de oscilaciones de pequeña señal en el sistema. Al introducir FACTS de tipo serie como lo es el TCSC (capacitor serie controlado por tiristores) al SMIB, se genera un modelo ampliado de Heffron-Phillips. El TCSC es un FACT de primera generación, que se conecta en serie con la línea y funciona como una impedancia variable, es decir que permite variar la impedancia de la línea, lo que a su vez produce un aumento en los márgenes de estabilidad y la capacidad de transmisión de la misma [1] [3] [7] [8].

En este artículo se realiza una comparación entre el sistema con y sin compensación, y se comprueba la capacidad del TCSC para amortiguar las oscilaciones de pequeña señal en los sistemas de potencia.

II. MODELO LINEAL DE HEFFRON PHILLIPS CONECTANDO UN TCSC AL SMIB

El sistema a analizar consta de una máquina síncrona conectada a un barraje infinito además de un TCSC conectado como

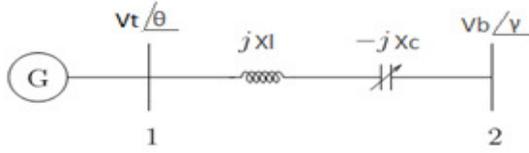
¹ Ingeniero Electricista, M. Sc.

² Ingeniero Electricista., Estudiante de Maestría en Ingeniería

³ Catalina González Ingeniera Electrónica, Estudiante de Maestría en Ingeniería Eléctrica.

Grupo de Investigación en Electrónica de Potencia Universidad Tecnológica de Pereira

muestra la fig.1. (Despreciando la resistencia de la línea), el barraje infinito simboliza el resto del sistema de potencia [2] [4-6].



[1]
[2] Figura 1. Máquina síncrona conectada a un barraje infinito incluyendo un TCSC

De La figura 1 V_t es la tensión en el terminal de la máquina, V_b es la tensión en el barraje infinito, X_L es la impedancia de la línea y X_c es la impedancia variable del TCSC.

Las ecuaciones diferenciales que describen el comportamiento de la máquina síncrona son:

$$\dot{E}'_q = -\frac{1}{T'_{do}}(E'_q + (X_d - X'_d)I_d - E_{fd}) \quad (1)$$

$$\dot{\delta} = \omega - \omega_s \quad (2)$$

$$\dot{\omega} = \frac{\omega_s}{2H} [T_M - (E'_q I_q + (X_q - X'_d)I_d I_q + D(\omega - \omega_s))] \quad (3)$$

$$\dot{E}_{fd} = -\frac{1}{T_A} [E_{fd} - K_A (V_{ref} - V_t)] \quad (4)$$

donde

E_{fd} : Tensión en el sistema de excitación en pu

T'_{do} : Constante de tiempo del eje d en circuito abierto

T_A : Constante de tiempo del excitador

T_M : Potencia Mecánica de entrada en pu

K_A : Ganancia del excitador

X_d : Reactancia síncrona del eje d en pu

X'_d : Reactancia transitoria del eje d en pu

X_q : Reactancia síncrona del eje q en pu

D : Coeficiente de amortiguamiento

H : Constante de inercia

δ : Ángulo del rotor del generador síncrono es radianes

I_d : Corriente en el eje d en pu

I_q : Corriente en el eje q en pu

V_{ref} : Tensión de referencia

Considerando el sistema de la figura 1 sin el TCSC la ecuación de la tensión en la barra 1 es [1] [10]:

$$V_t = V_b + jX_L I_t \quad (5)$$

Sin el compensador el sistema es el SMIB típico, en donde la corriente del sistema está definida como:

$$I_t = I_d + jI_q \quad (6)$$

$$I_q = \frac{V_b \text{sen}(\delta)}{X_q + X_L} \quad (7)$$

$$I_d = \frac{E'_q - V_b \cos(\delta)}{X'_d + X_L} \quad (8)$$

Cuando se instala el TCSC la ecuación que define la tensión en el terminal de la máquina cambia a [1] [10]:

$$V_t = V_b + j(X_L - X_{TCSC})I_t \quad (9)$$

El TCSC introduce el término de la impedancia variable con el fin de disminuir la impedancia de la línea, pero no solo cambia la tensión en el terminal, también cambian las corrientes en eje en cuadratura y eje directo I_q e I_d respectivamente [1]:

$$I_q = \frac{V_b \text{sen}(\delta)}{X_q + X_L - X_{TCSC}} \quad (10)$$

$$I_d = \frac{E'_q - V_b \cos(\delta)}{X'_d + X_L - X_{TCSC}} \quad (11)$$

A- CONSTRUCCION DEL MODELO LINEAL

El sistema se linealiza alrededor de un punto de operación (denotado por 0) alrededor del cual se presentan pequeñas variaciones. La forma lineal de las ecuaciones (10) y (11) está dada por [1]:

$$\Delta I_q = \left(\frac{\partial I_q}{\partial \delta} \right)_0 \Delta \delta + \left(\frac{\partial I_q}{\partial X_{csc}} \right)_0 \Delta X_{TCSC} \quad (12)$$

$$\Delta I_d = \left(\frac{\partial I_d}{\partial \delta} \right)_0 \Delta \delta + \left(\frac{\partial I_d}{\partial E'_q} \right)_0 \Delta E'_q + \left(\frac{\partial I_d}{\partial X_{csc}} \right)_0 \Delta X_{TCSC} \quad (13)$$

Linealizando las ecuaciones diferenciales de (1) a (4) y reemplazando las corrientes linealizadas (12) y (13) se tiene que [1-6] [10]:

$$\Delta \dot{E}'_q = \frac{[-K_3 \Delta \delta - K_4 \Delta E'_q - K_9 \Delta X_{TCSC} + \Delta E_{fd}]}{T'_{do}} \quad (14)$$

$$\Delta \dot{\delta} = \omega_0 \Delta \omega \quad (15)$$

$$\Delta \dot{\omega} = \frac{[-K_1 \Delta \delta - K_2 \Delta E'_q - K_7 \Delta X_{TCSC} - D \Delta \omega + \Delta T_M]}{2H} \quad (16)$$

Donde las constantes K_1 a K_4 son [1-6] [10]:

$$K_1 = (X_q - X'_d) \left[I_{q0} \left(\frac{\partial I_d}{\partial \delta} \right)_0 + I_{d0} \left(\frac{\partial I}{\partial \delta} \right)_0 \right] + E'_{q0} \left(\frac{\partial I_q}{\partial \delta} \right)_0 \quad (17)$$

$$K_2 = \left[(X_q - X'_d) \left(\frac{\partial I_d}{\partial E'_q} \right) + 1 \right] I_{q0} \quad (18)$$

$$K_3 = \left[1 + (X_d - X'_d) \left(\frac{\partial I_d}{\partial E'_q} \right)_0 \right]^{-1} \quad (19)$$

$$K_4 = (X_d - X'_d) \left(\frac{\partial I_d}{\partial \delta} \right)_0 \quad (20)$$

En la ecuación (5) V_t es la tensión en el terminal de la maquina síncrona y está definida como:

$$V_t = (V_d^2 + V_q^2)^{1/2} \quad (21)$$

Donde para un SMIB [1] [10]:

$$V_d = X_q I_q \quad (22)$$

$$V_q = E'_q - X'_d I_d \quad (23)$$

Al linealizar (21) se obtiene:

$$\Delta V_t = \left(\frac{\partial V_t}{\partial V_d} \right)_0 \Delta V_d + \left(\frac{\partial V_t}{\partial V_q} \right)_0 \Delta V_q \quad (24)$$

Linealizando (22) y (23) y reemplazando en (24):

$$\Delta V_t = K_5 \Delta \delta + K_6 \Delta E'_q + K_7 \Delta X_{TCSC} \quad (25)$$

Linealizando (4) y reemplazando (25) [1] [2] [10]:

$$\Delta \dot{E}'_{fd} = \frac{[-K_A (K_5 \Delta \delta + K_6 \Delta E'_q + K_7 \Delta X_{TCSC} - \Delta V_{ref}) - \Delta E'_{fd}]}{T_A} \quad (26)$$

Las constantes K_5 y K_6 están definidas así:

$$K_5 = \left[\frac{V_{d0}}{V_t} X_q \left(\frac{\partial I_q}{\partial \delta} \right)_0 - \frac{V_{q0}}{V_t} X'_d \left(\frac{\partial I_d}{\partial \delta} \right)_0 \right] \quad (27)$$

$$K_6 = \frac{V_{q0}}{V_t} \left[(1 - X'_d) \left(\frac{\partial I_d}{\partial E'_q} \right)_0 \right] \quad (28)$$

Las constantes K_7 , K_8 y K_9 son debidas a la inclusión del TCSC en el SMIB y son [1]:

$$K_7 = \frac{V_{d0}}{V_t} X_q \left(\frac{\partial I_q}{\partial X_{TCSC}} \right)_0 - \frac{V_{q0}}{V_t} X'_d \left(\frac{\partial I_d}{\partial X_{TCSC}} \right)_0 \quad (29)$$

$$K_8 = E'_{q0} \left(\frac{\partial I_q}{\partial X_{TCSC}} \right)_0 + (X_q - X'_d) \left[I_{q0} \left(\frac{\partial I_d}{\partial X_{TCSC}} \right)_0 + I_{d0} \left(\frac{\partial I_q}{\partial X_{TCSC}} \right)_0 \right] \quad (30)$$

$$K_9 = (X_d - X'_d) \left(\frac{\partial I_d}{\partial X_{TCSC}} \right) \quad (31)$$

El comportamiento dinámico del TCSC depende de los valores de los elementos reactivos del TCSC, del controlador y sus constantes. La topología del TCSC es la que se muestra en la figura 2, y está compuesto por un capacitor, un inductor y un arreglo de tiristores en antiparalelo [3] [7]:

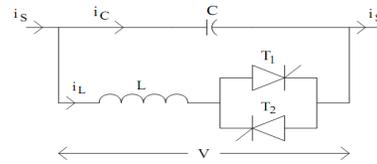


Figura 2. Estructura básica de un TCSC

El valor de la impedancia del TCSC depende de las impedancias inductiva y capacitiva, de la constante de compensación y del ángulo de disparo de los tiristores [3] [8] [9].

$$X_{TCSC} = X_c - \frac{X_c^2}{(X_c - X_L)} \frac{\sigma + \text{sen}(\sigma)}{\pi} + \frac{4X_c^2 \cos^2\left(\frac{\sigma}{2}\right) \left(K_{TCSC} \tan\left(\frac{K_{TCSC}\sigma}{2}\right) - \tan\left(\frac{\sigma}{2}\right) \right)}{(X_c - X_L) (K_{TCSC}^2 - 1) \pi} \quad (32)$$

La constante de compensación K_{TCSC} está dada por [3] [8] [9]:

$$K_{TCSC} = \sqrt{\frac{X_c}{X_L}} \quad (33)$$

Para modelar el control del TCSC se diseñó una red adelanto-atraso como la que se muestra:

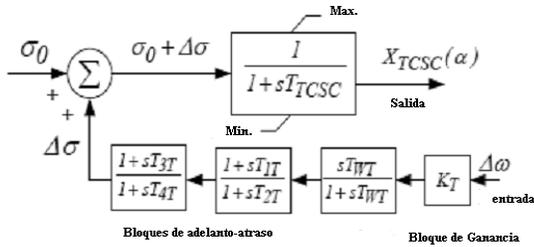


Figura 3. Estructura de la red de adelanto-atraso para el control del TCSC

La constante K_T es la ganancia del controlador la cual se escogió de manera arbitraria, al igual que las constantes T_1 y T_3 . Las constantes T_{WT} , T_2 y T_4 fueron tomadas de [8] y [9].

Una forma más detallada de describir el comportamiento dinámico del TCSC es a través de un método de sintonización de las constantes de la red de adelanto-atraso o diseñando un PID para el control del ángulo de disparo.

B- MODELO DE ESPACIO DE ESTADO Y DIAGRAMA DE BLOQUES

Tomando las ecuaciones (14), (15), (16), (26) y (32) se obtiene un sistema de ecuaciones linealizado el cual se puede expresar como una matriz:

$$\begin{bmatrix} \Delta \dot{E}'_q \\ \Delta \dot{\delta} \\ \Delta \dot{\omega} \\ \Delta \dot{E}'_{fd} \\ \Delta \dot{X}_{csc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{K_4}{T'_{do}} & \frac{K_3}{T'_{do}} & 0 & \frac{K_9}{T'_{do}} & \frac{1}{T'_{do}} \\ 0 & 0 & \omega_0 & 0 & 0 \\ \frac{K_2}{2H} & \frac{K_1}{2H} & -\frac{D}{2H} & 0 & -\frac{K_7}{2H} \\ \frac{K_A K_6}{T_A} & \frac{K_A K_5}{T_A} & 0 & -\frac{1}{T_A} & -\frac{K_A K_7}{T_A} \\ 0 & 0 & G_{TCSC}(S) & 0 & -\frac{1}{T_{TCSC}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta E'_q \\ \Delta \delta \\ \Delta \omega \\ \Delta E'_{fd} \\ \Delta X_{csc} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ \frac{1}{2H} & 0 \\ 0 & \frac{K_A}{T_A} \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta T_M \\ \Delta V_{ref} \end{bmatrix}$$

donde $G_{TCSC}(S)$ es la ganancia del controlador.

De las ecuaciones se obtiene el modelo Heffron-Phillips del sistema incluyendo al TCSC, el cual es mostrado en la figura 4 [3].

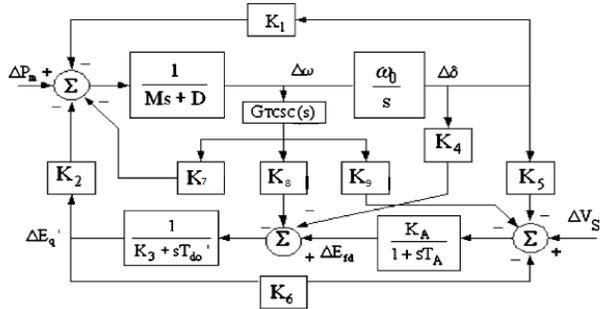


Figura 4. Diagrama de bloque del sistema

III. SIMULACIONES Y RESULTADOS

Se simulo el sistema bajo 2 escenarios y a través de 2 modelos distintos. Las simulaciones se realizaron mediante el software simulink de Matlab.

Primero se simulo utilizando el modelo lineal introduciendo una perturbación en el torque mecánico a los 50 s que varia el torque eléctrico de 1 a 1.04 pu. Otra perturbación se realizo a los 60 s que cambia nuevamente el torque eléctrico de 1.04 a 1 pu los resultados obtenidos son mostrados en la figura 5 Sin el efecto del compensador y en la figura 6 Incluyendo el efecto del compensador.

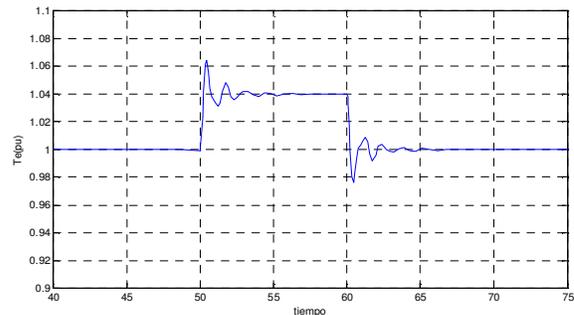


Figura 5. Respuesta del sistema ante una perturbación en potencia (modelo lineal)

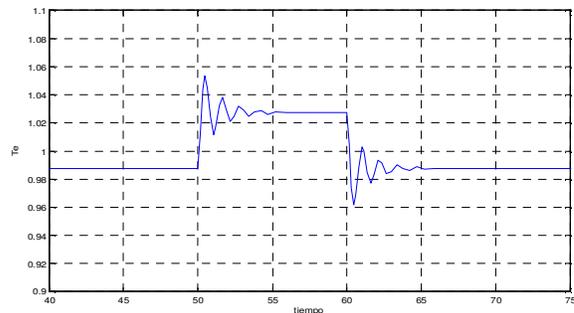


Figura 6. Respuesta del sistema ante una perturbación en potencia incluyendo el TCSC (modelo lineal)

De las graficas se puede observar una mejora tanto en el sobrepaso de la oscilación como en el tiempo de establecimiento de la misma usando el TCSC.

Compensación	Sobrepaso (pu)	Tiempo de Establecimiento(s)
Sin TCSC	0.064	8.1
Con TCSC	0.054	5.87

Tabla 1. Efecto de la perturbación en la potencia del sistema con y sin compensación en el modelo lineal

Ahora se simula el sistema con una perturbación en la tensión de referencia de 1 a 0.9 pu a los 100 s y nuevamente a los 110 s de 0.9 a 1 pu. Se obtuvieron las siguientes gráficas:

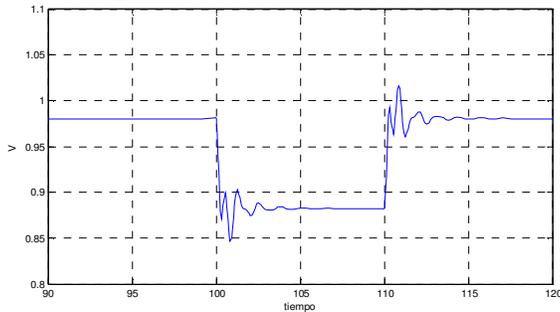


Figura 7. Respuesta del sistema ante una perturbación en tensión (modelo lineal)

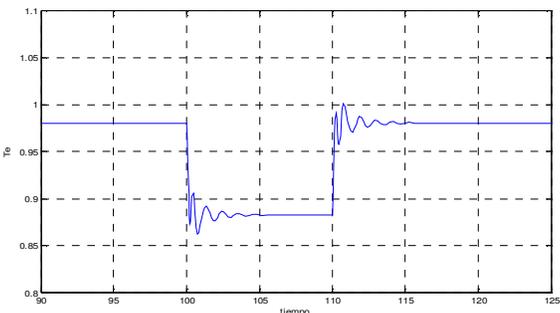


Figura 8. Respuesta del sistema ante una perturbación en tensión incluyendo el TCSC (modelo lineal)

Compensación	Sobrepaso (pu)	Tiempo de Establecimiento(s)
Sin TCSC	0.0355	8.7
Con TCSC	0.0206	6.9

Tabla 2. Efecto de la perturbación en la tensión del sistema con y sin compensación en el modelo lineal

Se puede comprobar por medio de los gráficos y los datos obtenidos que el TCSC mejora la respuesta ante pequeñas oscilaciones en la tensión del sistema.

Para comprobar la confiabilidad del modelo lineal se realiza una simulación no lineal, se genera una perturbación en el torque de 1 a 1.04 pu a los 50 s. Se obtiene que:

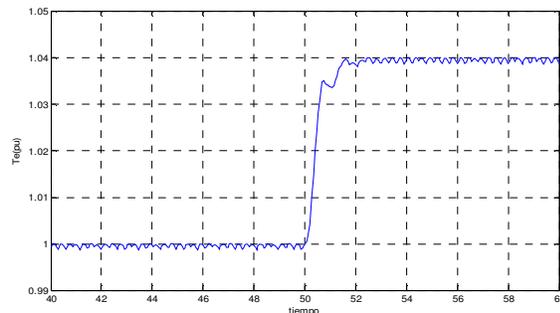


Figura 9. Respuesta del sistema ante una perturbación en potencia (modelo no lineal)

Luego se realiza una perturbación en la tensión de referencia de 1 a 1.1 pu a los 100 s, dando como resultado:

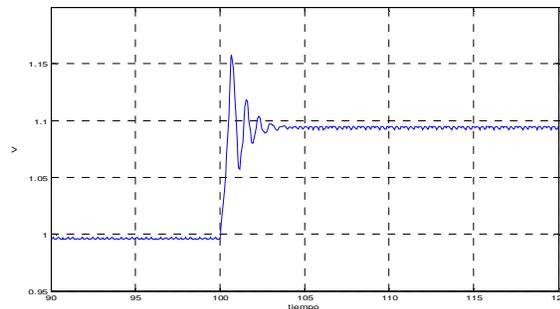


Figura 10. Respuesta del sistema ante una perturbación en tensión (modelo no lineal)

Considerando el TCSC en el modelo no lineal la respuesta el sistema ante perturbaciones de la misma magnitud es:

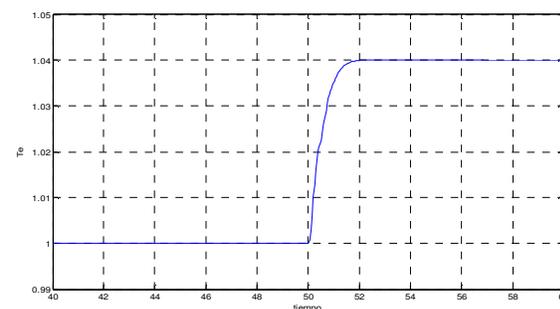


Figura 11. Respuesta del sistema ante una perturbación en potencia incluyendo el TCSC (modelo no lineal)

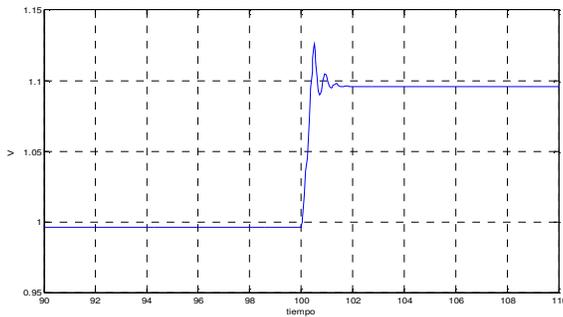


Figura 12. Respuesta del sistema ante una perturbación en tensión incluyendo el TCSC (modelo no lineal)

Compensación	Sobrepaso (pu)	Tiempo de Establecimiento(s)
Sin TCSC	0.05	2.73
Con TCSC	0	2

Tabla 3. Efecto de la perturbación en la potencia del sistema con y sin compensación en el modelo no lineal

Compensación	Sobrepaso (pu)	Tiempo de Establecimiento(s)
Sin TCSC	0.068	4.6
Con TCSC	0.026	0.96

Tabla 4. Efecto de la perturbación en la potencia del sistema con y sin compensación en el modelo no lineal

Se observa el efecto del TCSC en el sistema, el cual como se esperaba aumenta los márgenes de estabilidad y amortigua las pequeñas oscilaciones del sistema.

IV. CONCLUSIONES

Se comprobó que el TCSC mejora la estabilidad del sistema, esto se ve reflejado realizando una comparación entre el sobrepaso de las oscilaciones observado con y sin TCSC. Este hecho también se puede ver en el tiempo de establecimiento que bajo el efecto del compensador es menor.

El modelo lineal de Heffron-Phillips ampliado es una buena aproximación al sistema real pues comparado con el modelo no lineal las repuestas son similares.

La respuesta del sistema con el compensador puede ser aun mejor que la mostrada, si se sintonizan los parámetros de la red de adelanto-atraso utilizando métodos de ajustes analíticos o heurísticos.

REFERENCIAS

- [1]. L. R. S. Colman, and P. B. Araujo "Effects of the Thyristor Controlled Serie Capacitor on the Electric Power System, *IEEE/PES Transmission & Distribution Conference & Exposition: Latin America*, pp. 481-486, 2004.
- [2]. P. W. Sauer, *Power System Dynamics and Stability*, vol. I. New Jersey Prentice Hall, 1998, p. 221.
- [3]. Rashmi V, Garima G, "TCSC Controller Design Using Global Optimization for Stability Analysis of Single Machine Infinite-Bus Power System", *Department of Electrical Engineering PEC University of Technology, Chandigarh, India*, 2009.
- [4]. K.R. Padiyar, "Power System Dynamics Stability and Control", *Indian Institute of Science, Bangalore*. BS publications, 2008.
- [5]. P. Kundur, "Power System Stability Control", *McGraw Hill*, 1994.
- [6]. P.M. Anderson, A.A. Fouad, "Power System Control and Stability", Second Edition, *IEEE, Jhon Wiley & Sons, Inc*, 2003.
- [7]. Laurence Duarte Colvara, Silvio Cesar Braz Araujo and Ednilton Bressan Frestraits, "Stability Analysis of Power System Including Facts (TCSC) Effects by Direct Method Approach", *Electrical Power and Energy Systems*, 2005.
- [8]. S. Panda, N.P. Padhy and R.N. Patel, "Modelling, Simulation and optimal tuning of TCSC controller", *Department of Electrical Engineering, IIT, Roorke India*, 2007.
- [9]. Panda S., "Differential evolutionary algorithm for TCSC-based controller design", *Simulation Modelling Practice and Theory*, National Institute of science and technology, India, 2009.
- [10]. Alzate A., Torres C., Escobar A. "Efectos de un Compensador Síncrono Estático (SSSC) en un Sistema de Potencia", *Scientia et Technica*, Universidad Tecnológica de Pereira.

6. ANEXOS (DATOS USADOS PARA LA SIMULACIÓN)

6.1 PARÁMETROS DE LA MÁQUINA Y LA LÍNEA

$$X_e = 0.5; \quad X_d = 2.5; \quad X_q = 2.1; \quad R_a = 0; \quad R_e = 0; \\ X'_e = 0.001; \quad X'_d = 0.39; \quad X'_q = 0.23.$$

6.2 CONSTANTES COMPLEMENTARIAS AL MODELO DE LA MÁQUINA

$$D = 1; \quad H = 3.2; \quad M=2 \cdot H; \quad \omega_0 = 377; \quad T'_{doprima} = 0.96; \\ K_A = 400; \quad T_A = 0.2.$$

6.3 PUNTO DE OPERACIÓN

$$P = 0.8 ; Q = 0.4 .$$

6.4. PARÁMETROS DEL CONTROLADOR

$$K_i = 1 ; T_{WT1} = 0.1 ; T_{WT2} = 0.01 ; T_1 = 0.01 ;$$

$$T_2 = 0.1 ; T_3 = 0.01 ; T_4 = 0.1 .$$