

EFFECTOS DE UN COMPENSADOR SERIE SÍNCRONO ESTÁTICO (SSSC) EN UN SISTEMA DE POTENCIA

Effects of a Static Synchronous Series Compensator (SSSC) on a Power System

RESUMEN

En este artículo se muestran los efectos de compensación de un SSSC instalado en un sistema de potencia para el estudio de estabilidad de pequeña señal. El sistema es modelado incluyendo el efecto del compensador serie, como también el modelo de una máquina síncrona conectada a un barraje infinito (SMIB, *single machine infinite bus power system*) a través de una línea de transmisión. Se muestran los resultados de los modelos lineal y no lineal para diferentes perturbaciones obtenidos a través de simulación en el Matlab.

PALABRAS CLAVES: Estabilidad, FACTS, Modelo lineal y no lineal, SMIB, SSSC.

ABSTRACT

This paper shows the effects of compensation of a SSSC installed in an electric power system for small-signal stability studies. The system is modeled including the effect of the series compensator, and a linearized model for a synchronous machine connected to an infinite bus (SMIB) through a transmission line. The simulations results of the linear and nonlinear models for different disturbances are shown.

KEYWORDS: Stability, FACTS, Linear and no linear Models, SMIB, SSSC.

ALFONSO ALZATE G.

Ingeniero Electricista, M.Sc.
Profesor Titular
Ingeniería Eléctrica
Universidad Tecnológica de Pereira
alalzate@utp.edu.co

CARLOS ANDRÉS TORRES P.

Ingeniero Electricista.
Profesor Catedrático
Ingeniería Eléctrica
Universidad Tecnológica de Pereira
ctorres@ohm.utp.edu.co

ANDRÉS ESCOBAR MEJÍA

Ingeniero Electricista, M.Sc.
Profesor Auxiliar
Ingeniería Eléctrica
Universidad Tecnológica de Pereira
andreses1@utp.edu.co

GRUPO DE INVESTIGACIÓN EN ELECTRÓNICA DE POTENCIA

1. INTRODUCCIÓN

Ante las restricciones económicas y ambientales, así como la nueva estructura del sector eléctrico mundial, surge el concepto de FACTS (*Flexible AC Transmission System*) con el objetivo de aprovechar de la mejor manera la infraestructura existente de transmisión de energía eléctrica. Es importante reconocer que la disponibilidad actual de los controladores FACTS no cambia de manera significativa el procedimiento de la planeación ya que como razón principal del proceso está la búsqueda de la aplicación de cualquier dispositivo o dispositivos que maximicen el uso de la transmisión disponible.

El concepto de FACTS pertenece a una nueva generación de equipos basados en electrónica de potencia, básicamente con la misma función de otros equipos convencionales, pero con un alto grado de controlabilidad y capacidad de respuesta.

El SSSC es un tipo de FACTS conformado por un inversor de estado sólido, que inyecta un voltaje controlable en cuadratura con la corriente de línea, emulando un efecto de reactancia inductiva ó capacitiva con el fin influenciar el flujo de potencia en la línea de transmisión [1], [4], permitiendo de esta manera ampliar

los límites de estabilidad del sistema y a la vez mejorar algunos de los parámetros de operación.

Los análisis de operación del sistema conformado por una máquina síncrona conectada a un barraje infinito a través de una línea de transmisión para operación con pequeña señal han sido planteados desde hace algún tiempo y allí se han establecido los criterios básicos para garantizar la estabilidad de pequeña señal. Para estos análisis se utilizan modelos lineales de los componentes del sistema eléctrico [7]. En este artículo se describe el modelado del compensador serie en el sistema propuesto, y posteriormente es simulado mediante el software Matlab confirmando su efectividad.

2. MODELO DEL SSSC EN UN SMIB

Considere el sistema mostrado en la Figura 1 con un generador síncrono conectado a un barraje infinito a través de una línea de transmisión en donde el SSSC es instalado y V_t , V_∞ , e I_t son el voltaje terminal, el voltaje en el barraje y la corriente terminal de la máquina síncrona respectivamente.

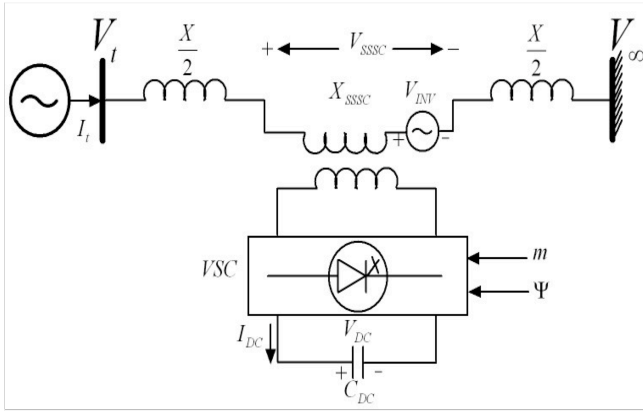


Figura 1. Máquina Síncrona en un Sistema de Potencia de Barraje Infinito con un SSSC.

El SSSC se compone de un transformador de acople serie con una reactancia de salida X_{SSSC} , un convertidor fuente de voltaje (VSC) trifásico basado en GTO (*Gate Turn Off*) y un capacitor DC. El VSC genera un voltaje controlable AC de la forma $V_{INV}(t) = V_{INV} \sin(\omega t - \psi)$ que se inyecta a través del transformador y con una variación adecuada de la magnitud y la fase se puede lograr un intercambio de potencia reactiva con el sistema de potencia [1], [4]. La ecuación de voltaje del sistema mostrado en la Figura 1, sin instalar el SSSC, puede ser escrita como:

$$V_t = jX \cdot I_t + V_\infty \quad (1)$$

Para esta situación, el sistema es la tradicional máquina síncrona conectada a un barraje infinito, en donde las ecuaciones de (2) a (7) se detallan con claridad en [2] y [3].

$$I_t = I_{td} + jI_{tq} = |I_t| \angle \phi \quad (2)$$

$$I_{tq} = \frac{V_\infty \cdot \text{sen}(\delta)}{X_q + X} \quad (3)$$

$$I_{td} = \frac{E_q' - V_\infty \cdot \cos(\delta)}{X_d' + X} \quad (4)$$

$$V_t = V_{td} + jV_{tq} \quad (5)$$

$$V_{td} = X_q \cdot I_{tq} \quad (6)$$

$$V_{tq} = E_q' - X_d' I_{td} \quad (7)$$

Instalando el SSSC en el sistema de potencia, la ecuación del voltaje terminal es dada por (8), (Ver Figura 1).

$$V_t = V_{INV} + V_\infty + j(X_{SSSC} + X) \cdot I_t \quad (8)$$

$$\begin{aligned} V_{INV} &= m \cdot k \cdot V_{DC} \cdot (\cos(\psi) + j \text{sen}(\psi)) \\ &= m \cdot k \cdot V_{DC} \angle \psi \end{aligned} \quad (9)$$

$$\frac{dV_{DC}}{dt} = \frac{m \cdot k}{C_{DC}} (I_{td} \cdot \cos(\psi) + I_{tq} \cdot \text{sen}(\psi)) \quad (10)$$

$$\psi = \phi \pm 90^\circ \quad (11)$$

Donde:

k : Es la relación de voltajes AC y DC del inversor. Este depende de la estructura del inversor que se utilice. Para el trabajo aquí presentado, se empleó uno de 12 pulsos.

m : Es el índice de modulación, el cual determina la magnitud del voltaje inyectado. Puede ser la señal de control de amortiguamiento para proveer una variación dinámica de compensación.

ψ : Es el ángulo del voltaje inyectado, el cual debe de permanecer en cuadratura con la corriente de línea.

Sustituyendo (2), (5)-(7), (9) en (8) y separando la parte real e imaginaria, se obtienen (12) y (13):

$$I_{tq} = \frac{V_\infty \cdot \text{sen}(\delta) + m \cdot k \cdot V_{DC} \cdot \cos(\psi)}{X_{SSSC} + X + X_q} \quad (12)$$

$$I_{td} = \frac{E_q' - V_\infty \cdot \cos(\delta) - m \cdot k \cdot V_{DC} \cdot \text{sen}(\psi)}{X_{SSSC} + X + X_d'} \quad (13)$$

El modelo no lineal de la máquina síncrona en un sistema de barraje infinito (Figura 1) se describe con las siguientes ecuaciones [2], [3].

$$\dot{\delta} = W - W_S \quad (14)$$

$$\begin{aligned} \dot{W} &= \frac{W_S}{M} \cdot \left[T_M - (E_q' \cdot I_{tq} + (X_q - X_d') I_{td} \cdot I_{tq}) - \right. \\ &\quad \left. - D \cdot (W - W_S) \right] \end{aligned} \quad (15)$$

$$\dot{E}_q' = \frac{1}{T_{d0}'} \left[E_{fd} - E_q' - (X_d - X_d') \cdot I_{td} \right] \quad (16)$$

$$\dot{E}_{fd} = -\frac{1}{T_A} \cdot [E_{fd} - K_A \cdot (V_{ref} - V_t)] \quad (17)$$

2.1 Modelo lineal de Heffron & Phillips incluyendo el SSSC.

Suponiendo variaciones pequeñas alrededor de un punto de operación (denotado por "o") la forma lineal de las ecuaciones (12) y (13) se presentan en (18) y (19) [5].

$$\Delta I_{iq} = \left(\frac{\partial I_{iq}}{\partial \delta} \right)_0 \Delta \delta + \left(\frac{\partial I_{iq}}{\partial m} \right)_0 \Delta m + \left(\frac{\partial I_{iq}}{\partial V_{DC}} \right)_0 \Delta V_{DC} \quad (18)$$

$$\begin{aligned} \Delta I_{td} = & \left(\frac{\partial I_{td}}{\partial E'_q} \right)_0 \Delta E'_q + \left(\frac{\partial I_{td}}{\partial \delta} \right)_0 \Delta \delta + \left(\frac{\partial I_{td}}{\partial m} \right)_0 \Delta m + \\ & + \left(\frac{\partial I_{td}}{\partial V_{DC}} \right)_0 \Delta V_{DC} \end{aligned} \quad (19)$$

Las ecuaciones (14) y (15) muestran la relación entre las variables mecánicas de la máquina síncrona (velocidad angular W y el ángulo interno δ), con las variables eléctricas (considerando variaciones pequeñas).

$$\Delta \dot{\delta} = W_0 \cdot \Delta W \quad (20)$$

La linealización de la ecuación (15) provee la variación del torque eléctrico de la máquina, debido a que internamente se encuentra la ecuación característica de este.

$$\begin{aligned} \Delta \dot{W} = & \frac{W_s}{M} \cdot [\Delta T_M - k_1 \cdot \Delta \delta - k_2 \cdot \Delta E'_q - k_{pm} \cdot \Delta m + \\ & - k_{pdc} \cdot \Delta V_{DC} - D \cdot \Delta W] \end{aligned} \quad (21)$$

$$\begin{aligned} k_1 = & (X_q - X'_d) \cdot I_{iq0} \left(\frac{\partial I_{td}}{\partial \delta} \right)_0 + \\ & + [E'_{q0} + (X_q - X'_d) \cdot I_{td0}] \cdot \left(\frac{\partial I_{iq}}{\partial \delta} \right)_0 \end{aligned} \quad (21.a)$$

$$k_2 = I_{iq0} + \left(\frac{\partial I_{td}}{\partial E'_q} \right)_0 \cdot (X_q - X'_d) \cdot I_{iq0} \quad (21.b)$$

$$\begin{aligned} k_{pm} = & (X_q - X'_d) \cdot I_{iq0} \cdot \left(\frac{\partial I_{td}}{\partial m} \right)_0 + \\ & + [E'_{q0} + (X_q - X'_d) \cdot I_{td0}] \cdot \left(\frac{\partial I_{iq}}{\partial m} \right)_0 \end{aligned} \quad (21.c)$$

$$\begin{aligned} k_{pdc} = & (X_q - X'_d) \cdot I_{iq0} \cdot \left(\frac{\partial I_{td}}{\partial V_{DC}} \right)_0 + \\ & + [E'_{q0} + (X_q - X'_d) \cdot I_{td0}] \cdot \left(\frac{\partial I_{iq}}{\partial V_{DC}} \right)_0 \end{aligned} \quad (21.d)$$

Sustituyendo (13) en (16) y linealizando alrededor de un punto de operación, se obtiene la ecuación (22).

$$\begin{aligned} \Delta \dot{E}'_q = & \frac{1}{T'_{d0}} \cdot [\Delta E_{fd} - k_3 \cdot \Delta E'_q - k_4 \cdot \Delta \delta \\ & - k_{qm} \cdot \Delta m - k_{qdc} \cdot \Delta V_{DC}] \end{aligned} \quad (22)$$

$$k_3 = 1 + (X_d - X'_d) \cdot \left(\frac{\partial I_{td}}{\partial E'_q} \right)_0 \quad (22.a)$$

$$k_4 = (X_d - X'_d) \cdot \left(\frac{\partial I_{td}}{\partial \delta} \right)_0 \quad (22.b)$$

$$k_{qm} = (X_d - X'_d) \cdot \left(\frac{\partial I_{td}}{\partial m} \right)_0 \quad (22.c)$$

$$k_{qdc} = (X_d - X'_d) \cdot \left(\frac{\partial I_{td}}{\partial V_{DC}} \right)_0 \quad (22.d)$$

Igualmente, el valor absoluto del voltaje terminal de la máquina síncrona $|V_t|$ mostrado en la ecuación (5), se linealiza alrededor de un punto de operación como se muestra en las ecuaciones (23) y (24).

$$\Delta V_t = \left(\frac{\partial V_t}{\partial V_{td}} \right)_0 \cdot \Delta V_{td} + \left(\frac{\partial V_t}{\partial V_{iq}} \right)_0 \cdot \Delta V_{iq} \quad (23)$$

$$\Delta V_t = k_5 \cdot \Delta \delta + k_6 \cdot \Delta E'_q + k_{vm} \cdot \Delta m + k_{vdc} \cdot \Delta V_{DC} \quad (24)$$

$$k_5 = X_q \cdot \frac{V_{td0}}{V_{t0}} \cdot \left(\frac{\partial I_{tq}}{\partial \delta} \right)_0 - X'_d \cdot \left(\frac{V_{tq0}}{V_{t0}} \right) \cdot \left(\frac{\partial I_{td}}{\partial \delta} \right)_0 \quad (24.a)$$

$$k_6 = \frac{V_{tq0}}{V_{t0}} - X'_d \cdot \left(\frac{V_{tq0}}{V_{t0}} \right) \cdot \left(\frac{\partial I_{td}}{\partial E'_q} \right)_0 \quad (24.b)$$

$$k_{vm} = X_q \cdot \frac{V_{td0}}{V_{t0}} \cdot \left(\frac{\partial I_{tq}}{\partial m} \right)_0 - X'_d \cdot \left(\frac{V_{tq0}}{V_{t0}} \right) \cdot \left(\frac{\partial I_{td}}{\partial m} \right)_0 \quad (24.c)$$

$$k_{vdc} = X_q \cdot \frac{V_{td0}}{V_{t0}} \cdot \left(\frac{\partial I_{tq}}{\partial V_{DC}} \right)_0 - X'_d \cdot \left(\frac{V_{tq0}}{V_{t0}} \right) \cdot \left(\frac{\partial I_{td}}{\partial V_{DC}} \right)_0 \quad (24.d)$$

Sustituyendo (24) en (17) se obtiene la ecuación (25), la cual representa la linealización del voltaje de campo de la máquina síncrona con un AVR de primer orden, donde V_{ref} es el voltaje de referencia [2], [3].

$$\Delta \dot{E}'_{fd} = -\frac{1}{T_A} \cdot [\Delta E'_{fd} + k_A \cdot (k_5 \cdot \Delta \delta + k_6 \cdot \Delta E'_q + k_{vm} \cdot \Delta m + k_{vdc} \cdot \Delta V_{DC} - \Delta V_{ref})] \quad (25)$$

Sustituyendo (12) y (13) y linealizando alrededor de un punto de operación se obtiene la ecuación (26).

$$\Delta \dot{V}_{DC} = k_7 \cdot \Delta \delta + k_8 \cdot \Delta E'_q + k_9 \cdot \Delta V_{DC} + k_{dm} \cdot \Delta m \quad (26)$$

$$k_7 = \left(\frac{\partial \dot{V}_{DC}}{\partial I_{td}} \right)_0 \cdot \left(\frac{\partial I_{td}}{\partial \delta} \right)_0 + \left(\frac{\partial \dot{V}_{DC}}{\partial I_{tq}} \right)_0 \cdot \left(\frac{\partial I_{tq}}{\partial \delta} \right)_0 \quad (26.a)$$

$$k_8 = \left(\frac{\partial \dot{V}_{DC}}{\partial I_{td}} \right)_0 \cdot \left(\frac{\partial I_{td}}{\partial E'_q} \right)_0 \quad (26.b)$$

$$k_9 = \left(\frac{\partial \dot{V}_{DC}}{\partial I_{td}} \right)_0 \cdot \left(\frac{\partial I_{td}}{\partial V_{DC}} \right)_0 + \left(\frac{\partial \dot{V}_{DC}}{\partial I_{tq}} \right)_0 \cdot \left(\frac{\partial I_{tq}}{\partial V_{DC}} \right)_0 \quad (26.c)$$

$$k_{dm} = \left(\frac{\partial \dot{V}_{DC}}{\partial m} \right)_0 + \left(\frac{\partial \dot{V}_{DC}}{\partial I_{td}} \right)_0 \cdot \left(\frac{\partial I_{td}}{\partial m} \right)_0 + \left(\frac{\partial \dot{V}_{DC}}{\partial I_{tq}} \right)_0 \cdot \left(\frac{\partial I_{tq}}{\partial m} \right)_0 \quad (26.d)$$

Con las ecuaciones (20)-(22) y (25)-(26) se obtiene el modelo linealizado del sistema de potencia incluyendo el SSSC como sigue:

$$\begin{bmatrix} \Delta \dot{\delta} \\ \Delta \dot{W} \\ \Delta \dot{E}'_q \\ \Delta \dot{E}'_{fd} \\ \Delta \dot{V}_{DC} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & W_0 & 0 & 0 & 0 \\ \frac{-k_1}{M} & \frac{-D}{M} & \frac{-k_2}{M} & 0 & \frac{-k_{pdc}}{M} \\ \frac{-k_4}{T'_{d0}} & 0 & \frac{-k_3}{T'_{d0}} & \frac{1}{T'_{d0}} & \frac{-k_{qdc}}{T'_{d0}} \\ \frac{-k_A k_5}{T_A} & 0 & \frac{-k_A k_6}{T_A} & \frac{-1}{T_A} & \frac{-k_A k_{vdc}}{T_A} \\ k_7 & 0 & k_8 & 0 & k_9 \end{bmatrix}$$

$$\bullet \begin{bmatrix} \Delta \delta \\ \Delta W \\ \Delta E'_q \\ \Delta E'_{fd} \\ \Delta V_{DC} \\ k_{dm} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{-k_{pm}}{M} \\ \frac{-k_{qm}}{T'_{d0}} \\ \frac{-k_A k_{vm}}{T_A} \\ k_{dm} \end{bmatrix} \cdot [\Delta m] + \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ \frac{1}{M} & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & \frac{k_A}{T_A} \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \Delta T_M \\ \Delta V_{ref} \end{bmatrix} \quad (27)$$

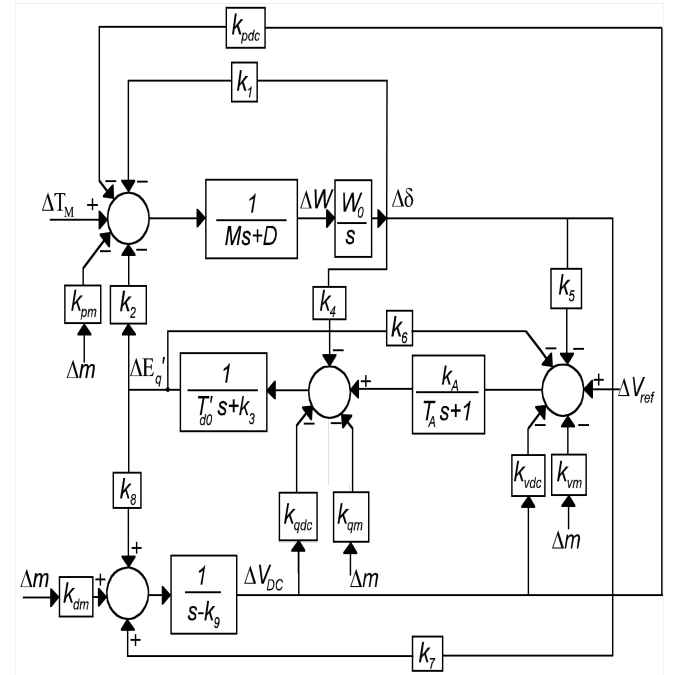


Figura 2. Modelo de Heffron-Phillips de un sistema SMIB con SSSC.

3. SIMULACIONES Y RESULTADOS

A continuación se muestran los resultados de las simulaciones efectuadas con el software Matlab con el fin de probar la operación del compensador en el sistema propuesto.

El sistema simulado, al cual se encuentra conectado el SSSC, presenta los siguientes parámetros:

Punto de operación: $P+jQ=0.6+j0.2 \quad V_t = 1\angle 15^\circ$

Máquina Síncrona:

$R_s = 0 \quad X_d = 2.5 \quad X_q = 2.1 \quad X'_d = 0.39$

$T'_{d0} = 9.6 \quad H = 3.2 \quad D = 1 \quad W_0 = 377$

AVR:

$K_A = 400 \quad T_A = 0.2$

Línea de Transmisión:

$R=0 \quad X=0.5$

SSSC:

$m = 0.00789 \quad k = \frac{2\sqrt{6}}{\pi} \quad X_{SSSC} = 1 \quad V_{DC0} = 1$

$C_{DC0} = 1$

Inicialmente se tiene que a los 30 segundos se aplica una perturbación en la referencia de tensión al incrementarla de 1 a 1.05 en el modelo linealizado, tal y como se observa en la Figura 3.

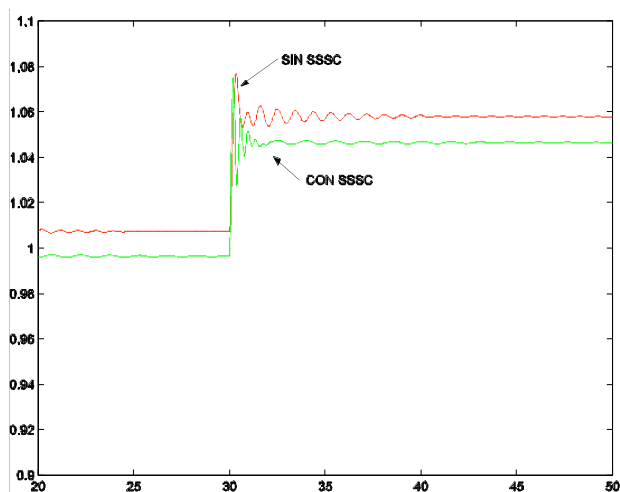


Figura 3. Respuesta de la tensión ante variación en la referencia sin y con SSSC, modelo lineal.

Ahora se realiza la simulación pero con el modelo no lineal, ya que este muestra de manera más aproximada el comportamiento del sistema con y sin SSSC. Los resultados se muestran en la Figura 4.

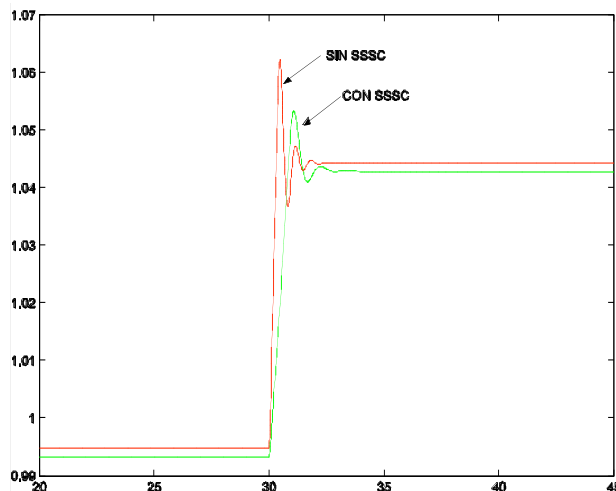


Figura 4. Respuesta de la tensión ante variación en la referencia sin y con SSSC, modelo no lineal.

Posteriormente se introduce un fallo a los 30 segundos, y de duración 1 segundo, el cual se presenta como una variación del 200% en el comportamiento de la carga. En esta situación se puede observar también el efecto que tiene el SSSC sobre la potencia activa. En esta situación solo se detalla para el modelo no lineal puesto que en este se refleja de mejor manera el efecto de las perturbaciones, tal y como se muestra en la Figura 5.

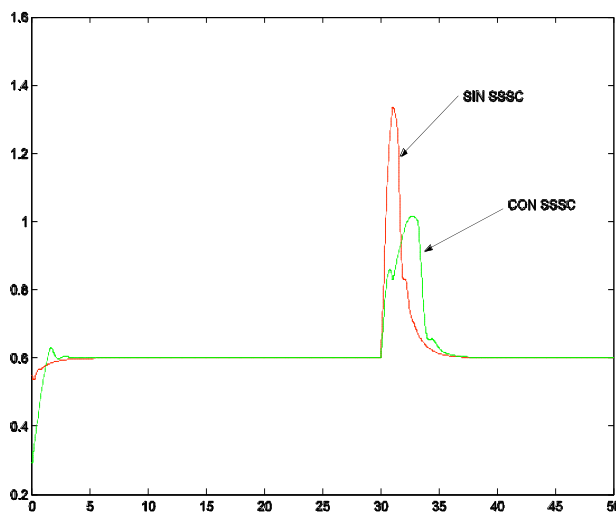


Figura 5. Respuesta ante una falla (perturbación fuerte) de la potencia activa sin y con SSSC, modelo no lineal.

Se puede notar claramente que el objetivo del compensador es ampliar los límites de estabilidad ya que se afectan los valores de régimen permanente del sistema. Para cada una de las pruebas se puede observar que con el SSSC los efectos presentados en el sistema después de la perturbación son menores.

4. CONCLUSIONES

El propósito inicial al usar el SSSC es el de mejorar la capacidad de transmisión de un sistema eléctrico de potencia lo cual lleva a mejorar sus márgenes de estabilidad; sin embargo, desde el punto de vista de la dinámica del sistema eléctrico se obtienen ventajas adicionales, las cuales se aprovechan para mejorar la respuesta ante pequeñas perturbaciones, reduciendo las oscilaciones que se presentan por efecto de estas.

Es así, como a partir de los resultados obtenidos se muestra que el uso del SSSC mejora la respuesta ante variaciones en la referencia, debido a su efecto amortiguador sobre las oscilaciones de tensión y potencia presentes en el sistema eléctrico. El efecto amortiguador se observa ante todo en la reducción del sobrepaso inicial, la reducción del tiempo de establecimiento y la reducción de la magnitud de las oscilaciones.

Aunque el propósito inicial del análisis es estudiar el comportamiento del sistema ante perturbaciones pequeñas, se hace un análisis de cómo responde este ante perturbaciones grandes, buscando que en lo posible el uso del SSSC no tenga un efecto adverso sobre el sistema. Sin embargo de los resultados obtenidos también se puede concluir que aún cuando las perturbaciones sean grandes, el efecto del SSSC es benéfico ya que los efectos de la falla son menos severos en el sistema, lo que garantiza la mejora de los márgenes de estabilidad del sistema eléctrico.

5. BIBLIOGRAFÍA

- [1]. H.F. Wang, "Design of Damping Controller to Improve Power System Oscillation Stability," AFRICON, IEEE, vol. 1, 28 Sept.-1 Oct. 1999 Page(s):495-500vol.1Digital Object Identifier 10.1109/AFRCON.1999.820931
- [2]. P. W. Sauer, Power System Dynamics and Stability, vol. I. New Jersey: Prentice Hall, 1998, p. 221.
- [3]. A. Alzate, Dinámica de sistemas eléctricos: Estabilidad y control Maestría en Ingeniería eléctrica 2000.UTP
- [4]. A. Kazemi, M. Ladjevardi and M.A.S Masoum, "Optimal Selection of SSSC Based Damping Controller Parameters For Improving Power System Dynamic Stability Using Genetic Algorithm," Iranian Journal of Science & Technology, Transaction B, Engineering, Vol. 29, N°.B1, 2005.
- [5]. 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.

- [6]. H. F. Wang. "Phillips-Heffron model of power systems installed with STATCOM and applications, "IEEE Proc.-Gener. Transm. Distrib., vol.146, N° 5, September 1999.
- [7]. A. Alzate, J. Asdrubal, and O. Castro "Efectos de un Compensador de VAR estático en el amortiguamiento de las oscilaciones, "SCIENTIA ET TECHNICA, vol.21, pp. 1-5, 2003.