

ANÁLISIS DE LA ESTABILIDAD DEL ÁNGULO DEL ROTOR DE UN SISTEMA MÁQUINA-BARRA INFINITA

Iván Camilo Durán Tovar

Ingeniero Electricista, Magíster Ingeniería Eléctrica. icdurant@unal.edu.co

Oscar David Flórez Cediel

Ingeniero Electricista, Magíster Ingeniería Eléctrica,
Docente Universidad Autónoma de Colombia. oscar.florez@fuac.edu.co

Recibido: 01-08-2010, aceptado: 30-11-2010, versión final: 21-11-2010

RESUMEN

Este artículo presenta una aproximación al análisis de estabilidad del ángulo del rotor de un sistema máquina-barra Infinita. Se analiza la estabilidad del ángulo del rotor de un sistema típico máquina-barra infinita, bajo determinadas condiciones de operación. Posteriormente se incorpora un estabilizador de sistema de potencia para lograr un amortiguamiento en el modo mecánico que permita mantener un sincronismo en su operación. Finalmente, se presentan los resultados con simulaciones realizadas con la herramienta computacional Matlab®.

Palabras clave: Power System Stabilizer - PSS, análisis de pequeña señal, estabilidad.

ABSTRACT

This article presents an approach to stability analysis angle of the rotor of a machine-infinite bus. We analyze the rotor angle stability of a typical bar machine infinite under certain operating conditions. It incorporates a power system stabilizer for a mode damping mechanism to maintain asynchronous in their operation. Finally, we present the results with simulations with the computational tool Matlab®.

Keywords: Power System Stabilizer-PSS, small signal analysis, stability.



1. INTRODUCCIÓN

Los sistemas de generación de energía son mecanismos muy complejos que pueden verse afectados por eventos como cambios en las cargas, perturbaciones mecánicas, maniobras en las líneas, cambios en los parámetros de los elementos propios del sistema, entre otros; para lo cual los operadores en las plantas deben tomar acciones que garanticen un servicio confiable y de buena calidad el mayor tiempo posible.

Con el aumento de sistemas de generación distribuida es indispensable analizarla operación y los eventos que pueden en algún momento presentarse y afectar la prestación del servicio.

Los análisis de estabilidad de potencia determinan la aplicación y operación de elementos que generen fuerzas iguales o superiores y opuestas a la perturbación causante de un desequilibrio del sistema que conlleva a una alteración del estado normal de trabajo.

Para reducir los efectos que se presentan por las perturbaciones se utilizan estabilizadores de sistemas de potencia (Power System Stabilizer - PSS) cuya función básica es generar una señal auxiliar al sistema de excitación de la máquina cuando se presentan oscilaciones del rotor que exceden valores predeterminados (Rangel, 2005).

2. ANÁLISIS DE PEQUEÑA SEÑAL

La estabilidad de pequeña señal es la capacidad de un sistema de potencia de mantener el sincronismo cuando está sometido a pequeñas perturbaciones. Una perturbación es pequeña si las ecuaciones dinámicas que describen la respuesta del sistema pueden linealizarse para el análisis, por ejemplo un cambio en la ganancia del regulador automático de tensión (automatic voltage regulator - AVR) (Grainger, 1994).

Un sistema de potencia considera múltiples variables dependientes de varios elementos cada uno con diferentes características. Para

un análisis de estabilidad se debe considerar la topología del sistema, el tipo de perturbación y las condiciones de operación entre otros.

La estabilidad de un sistema de potencia contempla el análisis del ángulo del rotor, de la frecuencia de la señal y de la tensión (Kundur, 1994).

La estabilidad del ángulo del rotor está asociada a perturbaciones de pequeña señal y de estabilidad transitoria. En términos de estabilidad de frecuencia se consideran dos intervalos, el primero va desde cero a diez segundos (Short Term) y el segundo desde algunos minutos hasta diez minutos en algunos casos (Long Term). La estabilidad de tensión requiere mantener constante los valores nominales de tensión con los cambios en la carga conectada al sistema, incluyendo la dinámica de la energía reactiva en todo momento (Kundur, 1994).

3. SISTEMA MÁQUINA-BARRA INFINITA

En el análisis de estabilidad de sistemas de potencia, generalmente se modelan con una máquina con valor de tensión interno constante, una inercia infinita y una impedancia ideal igual a cero. Esto es conocido como una barra infinita, considerando además que ésta se conecta el sistema de potencia (líneas de alta tensión, transformadores, etc.) al generador (Grainger, 1994) como se presenta en la figura 1, en donde V_t es la tensión de entrada a la línea, Z es la impedancia de la línea, V_o es la tensión de salida de la línea y Y es la impedancia de puesta a tierra (Sauer, 1998)

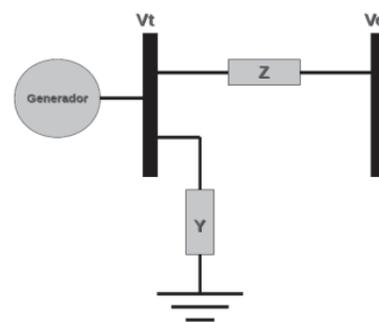


Figura 1
Máquina barra infinita

El modelo Phillips-Heffron considera cuatro constantes básicas (k_1, k_2, k_3 y k_4) para el circuito

de campo de la máquina, el cual se presenta en la figura 2 (Torres, 2008).

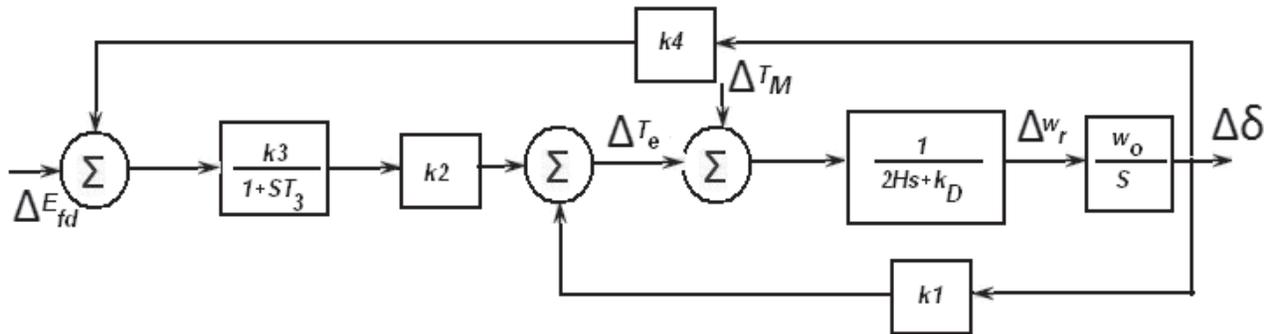


Figura 2
Diagrama de bloques del circuito de campo

La constante k_1 representa el coeficiente de torque sincronizado y está determinada por la siguiente expresión

$$k_1 = \cos(\delta_0) \left[\frac{V_{iq0} V_b}{X_{qT}} \right] + \sin(\delta_0) \left[\frac{X_q - X'_d}{X'_d + \frac{1}{2}(R_s + R_R)} \right] i_{q0} V_b \quad (1)$$

En donde δ_0 es el ángulo inicial, V_{iq0} es la tensión de armadura en el eje de cuadratura, V_b es la tensión en barra infinita, X_{qT} es la reactancia de la armadura en eje de cuadratura, X_q es la reactancia sincrónica del eje q, X'_d es la reactancia transitoria del eje d, R_s es la resistencia del estator, R_R es la resistencia del rotor e i_{q0} es la corriente de cuadratura inicial.

La constante k_2 relaciona las variaciones en el flujo de campo con la variación en el torque eléctrico mediante la expresión 2.

$$k_2 = \sin(\delta_0) \left[\frac{V_b}{X'_d + \frac{1}{2}(R_s + R_R)} \right] \quad (2)$$

La constante k_3 determina el factor de impedancia mediante la ecuación 3

$$k_3 = \frac{X'_d + \frac{1}{2}(R_s + R_R)}{X_d + \frac{1}{2}(R_s + R_R)} \quad (3)$$

Donde X_d es la reactancia sincrónica del eje d.

El cambio en el flujo de campo debido a los cambios en el ángulo de la carga está descrito por la constante k_4

$$k_4 = \sin(\delta_0) \left[\frac{X_d - X'_d}{X'_d + \frac{1}{2}(R_s + R_R)} \right] V_b \quad (4)$$

Dos constantes adicionales se tienen en cuanto al agregar un sistema de excitación y un AVR en la máquina, como se presenta en la figura 3 (Kundur, 1994). En las expresiones 5 y 6 se presentan los modelos matemáticos de las constantes k_5 y k_6 respectivamente.



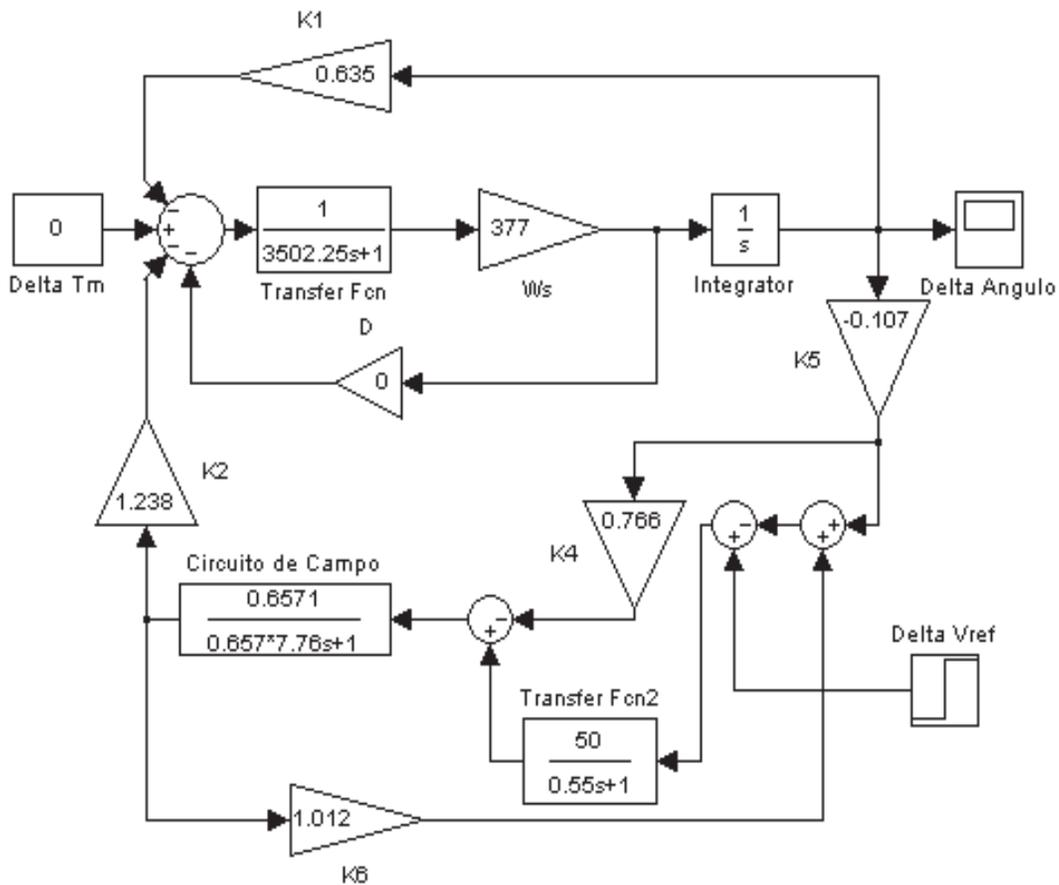


Figura 3
Diagrama de bloques del sistema máquina barra infinita

$$k_5 = \cos(\delta_0) \left[\frac{X_q V_{d0}}{X_{q'} V_{t0}} \right] V_b - \sin(\delta_0) \left[\frac{V_{q0} X'_d}{V_{t0} \left(X'_d + \frac{1}{2}(R_s + R_R) \right)} \right] V_b \quad (5)$$

En donde adicionalmente las variables V_{d0} es la tensión inicial en el eje d, V_{t0} es la tensión inicial de armadura, V_{q0} es la tensión inicial en el eje q.

$$k_6 = \frac{V_{q0} \left(\frac{1}{2}(R_s + R_R) \right)}{V_{t0} \left(X'_d + \frac{1}{2}(R_s + R_R) \right)} \quad (6)$$

Reemplazando los valores de las constantes presentadas en la tabla 1 se obtiene la respuesta del delta del ángulo, la cual se presenta en la figura 4 (Sánchez, Umbarila, 2008).

Tabla 1
Valores de las constantes del modelo Phillips-Heffron del sistema en estudio

CONSTANTE	VALOR
k_1	0,635
k_2	1,238
k_3	0,657
k_4	0,766
k_5	-0,107
k_6	1,012

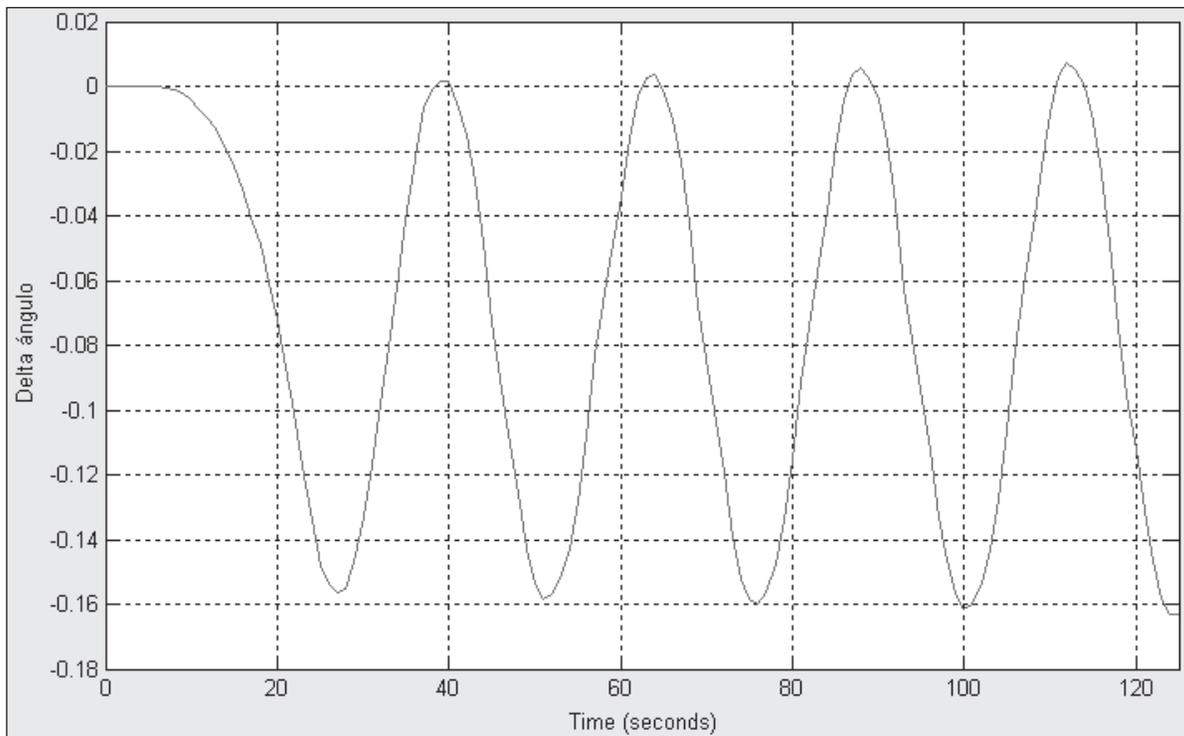


Figura 4
 Respuesta del sistema ante cambios en la tensión de referencia

Las ecuaciones de estado que representan al sistema son las siguientes:

$$\begin{bmatrix} \dot{\Delta E}_q \\ \dot{\Delta \delta} \\ \dot{\Delta V} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -1 & -k_4 & 0 \\ k_3 T'_{d0} & T'_{d0} & 0 \\ 0 & 0 & w_s \\ -k_2 & -k_1 & -Dw_s \\ 2H & 2H & 2H \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta E_q \\ \Delta \delta \\ \Delta V \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1 \\ T'_{d0} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \Delta E_{fd}$$

$$A = \begin{bmatrix} -1 & -k_4 & 0 \\ k_3 T'_{d0} & T'_{d0} & 0 \\ 0 & 0 & w_s \\ -k_2 & -k_1 & -Dw_s \\ 2H & 2H & 2H \end{bmatrix} \quad B = \begin{bmatrix} 1 \\ T'_{d0} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

Reemplazando los valores de las constantes para hallar los valores de las matrices A y B

Para encontrar la solución se considera el siguiente sistema de matrices.

$$A = \begin{bmatrix} -0,196 & -0,1 & 0 \\ 0 & 0 & 377 \\ -3,5 \times 10^{-4} & -1,8 \times 10^{-4} & 0 \end{bmatrix} \quad B = \begin{bmatrix} 0,129 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} \dot{\Delta E}_q \\ \dot{\Delta \delta} \\ \dot{\Delta V} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta E_q \\ \Delta \delta \\ \Delta V \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \Delta E_{fd} \end{bmatrix}$$

Por lo tanto las expresiones de relación de cambio para la tensión, la frecuencia y el ángulo son las siguientes

$$\begin{aligned} \dot{\Delta E}_q &= -0,196 \Delta E_q - 0,1 \Delta \delta + 0,129 \Delta E_{fd} \\ \dot{\Delta \delta} &= 377 \Delta V \\ \dot{\Delta V} &= -0,00035 \Delta E_q - 0,00018 \Delta V \end{aligned}$$

Las matrices A y B están descritas por las siguientes expresiones



Los modos mecánicos y eléctricos están definidos por los valores propios de la matriz que se presenta a continuación

$$\begin{pmatrix} 0 & \frac{-k_1}{M} & \frac{-k_2}{M} & 0 \\ \omega_s & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{-k_4}{T'_{d0}} & \frac{-1}{k_3 T'_{d0}} & \frac{1}{T'_{d0}} \\ 0 & \frac{-k_a k_5}{T_a} & \frac{-k_a k_6}{T_a} & \frac{-1}{T_a} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 0,18 + 4,72i \\ 0,18 - 4,72i \\ -1,2 + 3,9i \\ -1,2 - 3,9i \end{pmatrix}$$

Reemplazando por los valores correspondientes se plantea la siguiente matriz

$$\begin{pmatrix} 0 & -0,07 & -0,13 & 0 \\ 377 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -0,1 & -0,2 & 0,13 \\ 0 & 9,7 & -92 & -1,8 \end{pmatrix}$$

Obteniendo finalmente los modos mecánicos en las filas 1 y 2 y los modos eléctricos en las filas 3 y 4.

4. SISTEMA DE CONTROL SUPLEMENTARIO

Para mantener el sistema controlado ante las perturbaciones de pequeña señal se incorpora al modelo un PSS de manera que se logre un amortiguamiento en el modo mecánico.

En la figura 5 se presenta un PSS de modo derivativo con realimentación, el cual se aplica al sistema en estudio (Kundur, 1994).

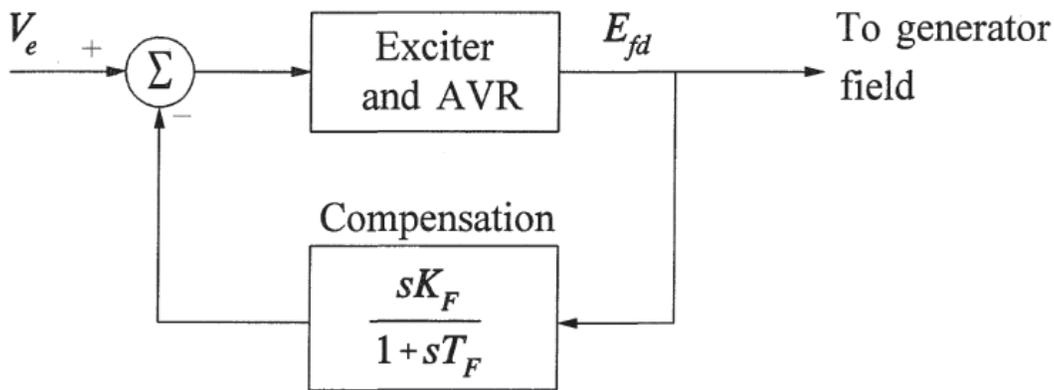


Figura 5
PSS derivativo con realimentación

Incorporando el PSS tal como se muestra en la figura 6, se obtiene el control en la señal del

ángulo dentro de unos parámetros particulares como se aprecia en la figura 7.

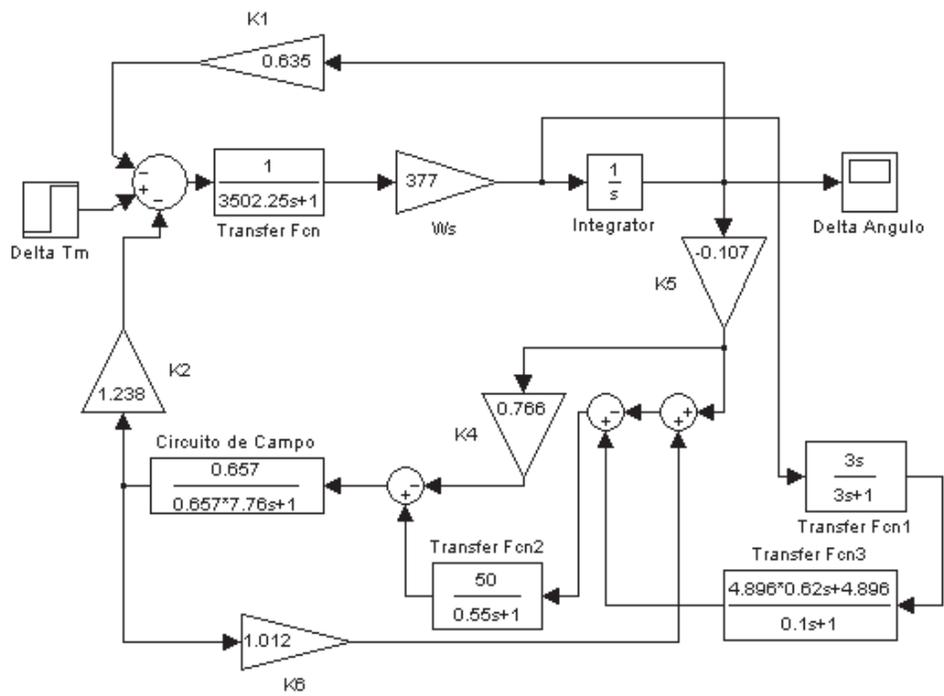


Figura 6
Diagrama de bloques del sistema máquina barra infinita con PSS

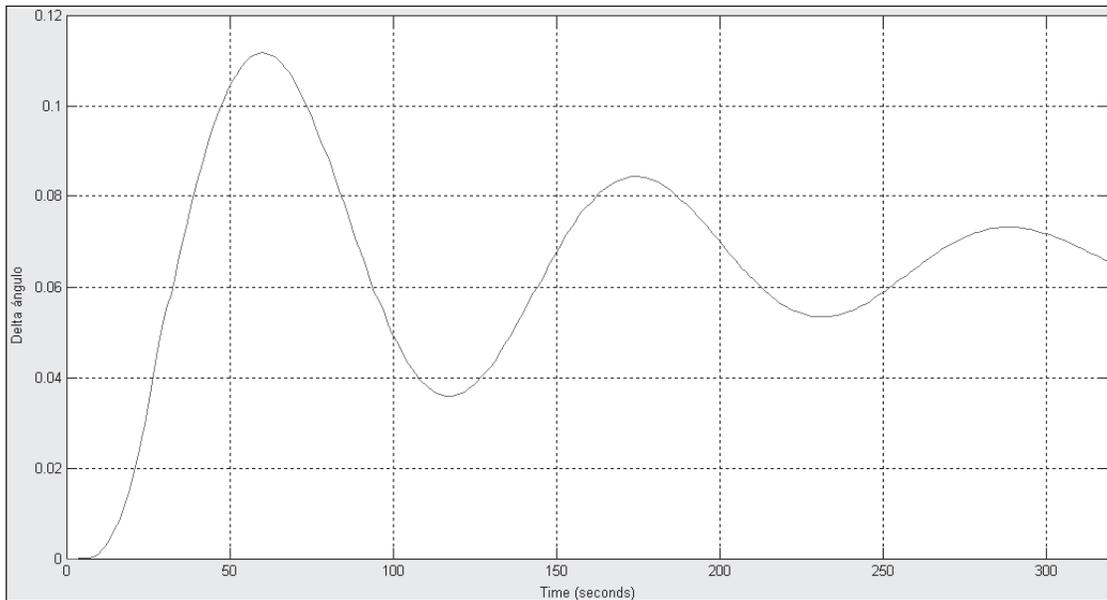


Figura 7
Respuesta del sistema ante cambios en la tensión de referencia con PSS

5. CONCLUSIONES

El ángulo del rotor sin PSS presenta grandes cambios en su amplitud durante un gran intervalo de tiempo, lo que ocasiona esfuerzos mecánicos que disminuyen la vida útil del sistema de generación, afectando la señal de salida y la sincronización con el sistema de transmisión.

El PSS incorporado logra estabilizar el ángulo del rotor con disturbios de pequeña señal de

manera satisfactoria en un intervalo de tiempo de 250 s, lo que garantiza una operación estable del sistema de generación.

Es importante incorporar a la estabilidad de sistemas de generación distribuida el impacto de cargas electrónicas para determinar las variables que más se pueden afectar y como esto modifica la operación del sistema.

REFERENCIAS

- RANGEL P. C. (2005). *Diseño y simulación de un controlador difuso multivariable centralizado para la estabilidad de un sistema de potencia multiárea*. Trabajo de grado. Bogotá. Universidad de los Andes, 47 p.
- GRAINGER, J. (1994). *Power system analysis*. McGraw-Hill.
- KUNDUR, P. (1994). *Power system stability and control*. McGraw-Hill.
- SAUER, Peter (1998). PAI, M.A. *Power system dynamics and stability*. Prentice Hall.
- SÁNCHEZ, John; UMBARILA, David (2008). *Herramienta de ayuda para el Análisis Modal en la evaluación de Estabilidad de Voltaje*. Proyecto final Curso Control y Estabilidad de Sistemas de Potencia. Universidad de los Andes.
- TORRES, A. (2008). *Control y estabilidad de sistemas de potencia*. Apuntes de clase. Universidad de los Andes.