

Desarrollo de un estabilizador de potencia para una máquina síncrona usando técnicas de auto-sintonización

Development of a Power Stabilizer for a Synchronous Machine Using Self-Tuning Techniques

SANDRA MILENA PÉREZ LONDOÑO

Ingeniera Electricista y Magíster en Ingeniería Eléctrica de la Universidad Tecnológica de Pereira. Docente del Programa de Ingeniería Eléctrica de la misma Universidad.
saperez@utp.edu.co

JUAN JOSÉ MORA FLÓREZ

Ingeniero Electricista y Magíster en Potencia Eléctrica de la Universidad Industrial de Santander. Magíster en Tecnologías de la Información de la Universitat de Girona (España) y estudiante de Doctorado en la misma Universidad. Docente del Programa de Ingeniería Eléctrica de la Universidad Tecnológica de Pereira.
jjmora@utp.edu.co

Clasificación del artículo: investigación

Fecha de recepción: 6 de abril de 2006

Fecha de aceptación: 13 de octubre de 2006

Palabras clave: estabilizador del sistema de potencia, auto-sintonización, máquina síncrona

Key words: power system stabilizer, self tuning, synchronous machine

RESUMEN

Entre los problemas que afectan la calidad de la energía eléctrica se encuentra la inestabilidad oscilatoria de las máquinas síncronas. Para mantener la estabilidad se usan controles suplementarios de excitación, entre ellos los Estabilizadores del Sistema de Potencia (PSS). Este artículo presenta la implementación de un PSS mediante la utilización de una técnica adaptativa, para superar algunos de

los problemas de inestabilidad ante perturbaciones causadas por la variación en la carga o en el voltaje de referencia. Como resultado, se describen las pruebas realizadas en un prototipo real que permiten observar el buen comportamiento del PSS. La aplicabilidad y eficiencia del método aquí propuesto se muestran mediante la validación experimental de los postulados teóricos.

ABSTRACT

One of the problems that affect power quality is related to oscillatory instability of synchronous machines. Supplementary field controls as the power system stabilizer (PSS) are normally used to maintain the stability. This paper shows a PSS implementation by using an adaptive technique to

overcome some instability problems, mainly caused by sudden load of voltage reference variations. As a result, tests performed in a real machine show the good behavior of the PSS. This experimental validation of the theoretical postulates shows the applicability and the efficiency of the approach proposed here.

* * *

1. Introducción

En el actual ambiente de libre competencia del sector eléctrico, la calidad es un reflejo de la participación de las empresas en el mercado energético y uno de los aspectos de mayor interés frente a las exigencias del sector a nivel mundial [1]. En Colombia, a partir del establecimiento del nuevo marco regulatorio del sector eléctrico, se pretende fortalecer la distribución y el mercado minorista desde la óptica de la calidad del producto [2]. La dependencia existente entre la vida humana y la energía eléctrica ha determinado que cada vez y con más insistencia se requiera que el suministro se realice bajo criterios de seguridad, confiabilidad y calidad [3].

Uno de los problemas que pueden afectar la adecuada prestación del servicio de energía eléctrica está asociado con la inestabilidad oscilatoria permanente en una máquina síncrona, que puede solucionarse mediante la utilización de dispositivos conocidos genéricamente como controles suplementarios de excitación [4], cuyo objetivo es proporcionar una señal que ayude a amortiguar las oscilaciones, a pesar de los posibles cambios de voltaje ocasionados por la demanda, por los cambios en la estructura de la red y/o por perturbaciones severas.

En este artículo se presenta el desarrollo de un estabilizador de potencia que se adapta a la variación del comportamiento de una máquina síncrona. En el numeral 2 se describen los aspectos básicos de los estabilizadores de sistemas de potencia, en el 3 se

presenta la implementación de potencia adaptivo, a partir de técnicas de auto sintonización, y en el 4 se describen las pruebas y resultados obtenidos ante variaciones en el valor de la referencia de tensión en terminales del generador y en la carga. Finalmente, se resaltan las conclusiones más importantes de la investigación.

2. Control de la estabilidad del sistema de potencia

Entre los controles suplementarios se encuentra el Estabilizador de Sistemas de Potencia (PSS), que es un elemento que provee una entrada adicional al regulador automático de voltaje (sigla en inglés AVR), para mejorar el comportamiento del sistema, reduciendo las oscilaciones y eliminando los efectos del amortiguamiento negativo causado por el AVR [5, 6].

El PSS es un controlador auxiliar de la máquina síncrona que, usado en conjunto con su sistema de excitación, provee señales de control que mejoran el amortiguamiento de las oscilaciones. El estabilizador controla el valor de la excitación aplicada al campo con la ayuda del AVR a través de la detección en el cambio de una variable de salida (potencia, velocidad, frecuencia), que se produce al ocurrir una perturbación en la máquina [7].

En el diagrama 1 se presenta la estructura generalizada del controlador PSS.

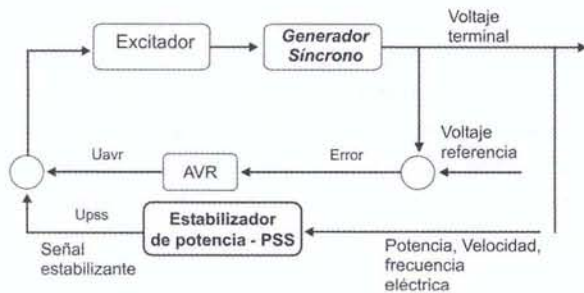


Diagrama 1. Utilización del estabilizador del sistema de potencia

Debido a que los parámetros de la máquina síncrona cambian con la carga y con las condiciones de operación del sistema, varía también su comportamiento dinámico. Si se tiene en cuenta que los estabilizadores convencionales se diseñan para trabajar adecuadamente para un punto de operación, éstos no funcionarán adecuadamente ante las situaciones reales expuestas [5, 8]. Entonces, lo requerido es diseñar controladores que se ajusten a la variación del comportamiento de la máquina. Esta alternativa la tienen las técnicas de control de auto-sintonización; en ellas los parámetros del modelo del sistema bajo estudio son identificados en línea y el control es calculado usando una estrategia preseleccionada [9, 10].

Diferentes artículos técnicos demuestran el desarrollo frecuente de PSS basados en metodologías adaptivas y su amplia utilización en el área del control no lineal [11-13]. Entre las metodologías más importantes se encuentran el método de la reubicación de polos en línea y el de programación de ganancia; no obstante, para poder emplear estas técnicas se necesitan modelos lineales de los sistemas, expresados en función de los parámetros de las máquinas, que en muchos casos no son fáciles de determinar [14-16].

3. Estabilizador del sistema de potencia adaptivo

La aplicación de técnicas de control adaptivo en el diseño de PSS tiene el propósito de incrementar la robustez del controlador ante cambios en la condi-

ciones de operación y en la configuración del sistema de potencia. La idea básica del control adaptivo es modificar los parámetros que definen el regulador de acuerdo con el comportamiento instantáneo del sistema en tiempo real, para lograr que en cada instante de tiempo el regulador entregue la señal de control adecuada para las condiciones actuales del sistema [17-20].

Existen diferentes técnicas de control adaptivo. Algunas utilizan procedimientos de identificación de los parámetros del modelo del sistema en tiempo real; en otras, los controladores están basados en modelos linealizados para diferentes puntos de operación, y en algoritmos de cálculo de los parámetros [13]. En [21] se presenta un estado del arte de los métodos de control utilizados en la implementación de estabilizadores de sistemas de potencia.

El esquema de la implementación que aquí se presenta consiste en un controlador que adapta su señal de salida a los cambios en las condiciones de operación de la máquina, mediante la identificación de los parámetros en línea de una función de transferencia de la máquina síncrona y el cálculo posterior de la acción de control a partir del modelo identificado.

3.1. Identificación en línea del sistema

Existen diversos modelos matemáticos de máquinas síncronas, que pueden ser tan complejos como se desee; cuando ellos son utilizados en el análisis de un sistema de potencia, unos ofrecen mejores resultados que otros. Asimismo, existen diferentes metodologías para desarrollar modelos de máquina. Entre ellos están los métodos tradicionales especificados por los estándares IEEE, en que se asume una estructura conocida para la máquina, utilizando la teoría relacionada con la transformación de Park; el modelo así obtenido se plantea en función de los parámetros físicos de la máquina y obliga a obtener los parámetros requeridos mediante algunos ensayos especiales que implican sacar la máquina de funcionamiento; esto último, no siempre es viable, por ejemplo cuando se trata de un generador interconectado a un gran sistema.

Una alternativa diferente consiste en asimilar la máquina síncrona a una caja negra y plantear una función de transferencia de su funcionamiento empleando los datos de entrada y salida que ella genera [18]. Esta metodología se conoce como identificación en línea e incluye la medición de algunas señales eléctricas de la máquina, sin necesidad de aislarla, con el fin de determinar en todo momento los términos de su función de transferencia, que en este caso serán diferentes a los parámetros de la máquina. También, existen otras técnicas matemáticas que, a partir de estos datos, permiten determinar los parámetros físicos posteriormente [22].

En este trabajo se implementó la identificación en línea de una función de transferencia de la máquina, que se detalla a continuación.

En forma general, un sistema puede ser descrito por el modelo expresado en la ecuación (1):

$$y(k) = \phi(k-1)^T \theta_0 \quad (1)$$

En la ecuación (1), $y(k)$ es la salida del sistema, $\phi(k-1)$ es un vector que es función lineal o no lineal de señales de entrada y salidas tomadas en instantes de tiempo anteriores. θ_0 es el vector que contiene los parámetros $b_0 \dots b_m$ y $a_0 \dots a_n$, de la función de transferencia que representa la planta, de acuerdo con la ecuación (2).

$$G(z) = \frac{Y(z)}{U(z)} = \frac{b_m z^m + b_{m-1} z^{m-1} + \dots + b_{m-m} z^{m-m}}{z^n + a_{n-1} z^{n-1} + \dots + a_{n-n} z^{n-n}} \quad (2)$$

En (2), n es el orden del modelo de la planta, y $m = n-1$.

Análisis previos [19] muestran que es suficiente considerar el orden del modelo del sistema como tres, en comparación con el incremento computacional que sería requerido un modelo de orden mayor. En consecuencia, como entradas al algoritmo de identificación se utilizan los valores actuales y los dos obtenidos antes de las señales de entrada y salida de la planta, medidos en instantes discretos de tiempo, de acuerdo con (3).

$$\{y(k), y(k-1), y(k-2)\} \text{ y } \{u(k), u(k-1), u(k-2)\} \quad (3)$$

En un sistema real, los parámetros del modelo descrito por la ecuación (2) son difíciles de calcular, dado que pueden cambiar con la operación del sistema. Para ello existen varios métodos de identificación, entre ellos la técnica recursiva de mínimos cuadrados; con esta metodología los parámetros podrán determinarse en todo momento, ante cualquier cambio en la planta.

Sea los parámetros estimados de la planta; entonces la salida estimada está dada por (4).

$$\hat{y}(k) = \phi(k-1)^T \hat{\theta}(k-1) \quad (4)$$

Por tanto, el error se define de la siguiente forma:

$$e(k) = y(k) - \hat{y}(k) \quad (5)$$

Entre los métodos utilizados para la identificación de un sistema se encuentra el algoritmo de proyección [23], que determina la estimación del vector de parámetros θ , como se muestra en (6).

$$\hat{\theta}(k) = \hat{\theta}(k-1) + \frac{a\phi(k-1)}{c + \phi(k-1)^T \phi(k-1)} [y(k) - \phi(k-1)^T \hat{\theta}(k-1)] \quad (6)$$

En la anterior ecuación, es la estimación inicial que se supone conocida, $0 < a < 2$ y $c > 0$.

3.2. Implementación del identificador

En este esquema el identificador utiliza el algoritmo de mínimos cuadrados normalizado y sus entradas son: la potencia activa de la máquina síncrona actual $Pa(k)$, sus dos valores anteriores $Pa(k-1)$, $Pa(k-2)$ y la señal estabilizante $Upss(k)$ con sus valores anteriores $Upss(k-1)$, $Upss(k-2)$. El vector de parámetros estimados por el identificador está definido así:

$$\theta_0^T \triangleq [b_2 \quad b_1 \quad b_0 \quad -a_2 \quad -a_1 \quad -a_0] \quad (7)$$

En el diagrama 2 se presenta la implementación del PSS. El AVR está encargado de actuar rápidamente sobre la excitación de la máquina síncrona,

para reestablecer ciertas condiciones cuando ésta es sometida a perturbación. El AVR empleado en este trabajo es del tipo PI clásico; esto significa que sus constantes proporcionales, K_p , e integral, K_i son establecidas en forma empírica y emplean el método de ensayo-error para definir la condición nominal de operación de la máquina.

El procedimiento para sintonizar el controlador es el siguiente: se elige un valor inicial para K_p , que no genere gran sobreoscilación cuando la máquina se somete a una señal tipo escalón en el circuito de campo; en ese mismo momento la constante K_i se hace cero; luego se reduce un poco la constante proporcional para añadir la constante integral, con la que se busca anular o, en su defecto, reducir el error en régimen permanente [24].

Los valores de las constantes, obtenidas aplicando este procedimiento, fueron $K_p=1$ y $K_i=0.7$.

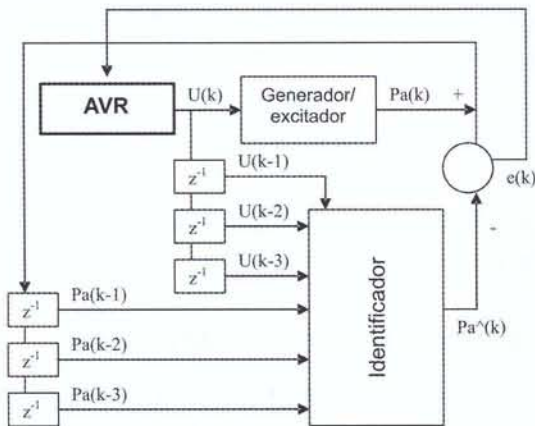
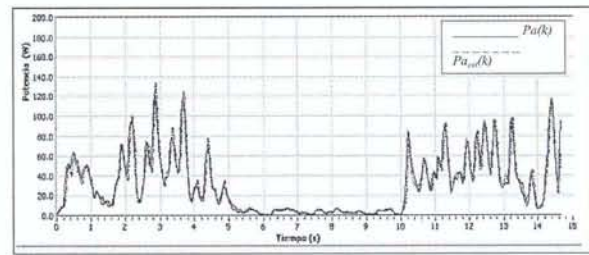


Diagrama 2. Sistema de identificación

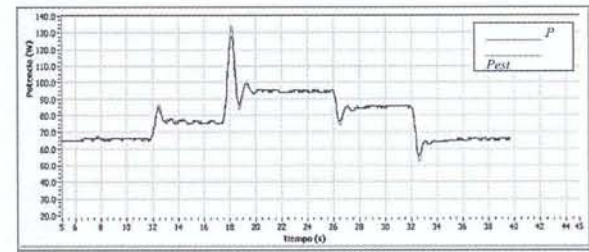
3.3. Resultados del sistema de identificación

Para verificar la respuesta del identificador implementado la planta fue sometida a una entrada tipo aleatorio, obteniéndose el resultado ilustrado en la gráfica 1. La línea continua representa la señal de potencia medida $Pa(k)$ y la línea punteada la potencia estimada por el identificador $Pa_{est}(k)$.



Gráfica 1. Respuesta del identificador en lazo abierto

En la gráfica 2 se presenta la respuesta del identificador, cuando se cierra el lazo de control a través del regulador, y se varía en forma aleatoria la carga del generador. La señal estimada, P_{est} , (en línea clara), sigue la señal de potencia medida P (en línea oscura). Se observa que el identificador sigue la señal real de la planta.



Gráfica 2. Respuesta del identificador en lazo cerrado, ante variación de carga

3.4. Implementación del controlador PSS

En el diagrama 3 se presenta el diagrama completo utilizado en la implementación del estabilizador adaptativo. En el esquema se muestra que el identificador es el generador de parámetros que permite generar la señal de control al PSS adaptativo.

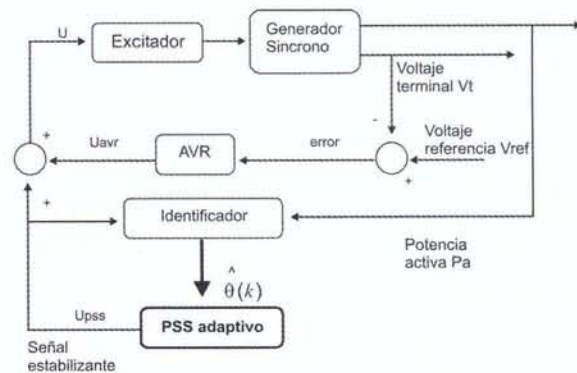


Diagrama 3. Configuración del sistema

La señal de entrada a la planta proviene del controlador que, de acuerdo con la desviación de la salida de la planta con respecto a su referencia, calcula la señal de control U necesaria, compuesta por la salida del AVR y el PSS adaptivo.

Para calcular la señal de control U_{pss} , el estabilizador adaptivo utiliza los parámetros entregados por el sistema de identificación y las señales de entrada al identificador $Pa(k)$, $Pa(k-1)$, $Pa(k-2)$, $U_{pss}(k-1)$, $U_{pss}(k-2)$, tal como se propone en [25] y se presenta a continuación:

$$U_{pss}(k) = \frac{1}{b_2} [a_1 Pa(k-1) + a_2 Pa(k) + a_0 Pa(k-2) - b_1 U_{pss}(k-1) - b_0 U_{pss}(k-2)] \quad (8)$$

El algoritmo desarrolla los siguientes pasos en cada intervalo de muestreo:

- Lectura de la potencia $Pa(k)$ y $U_{pss}(k)$.
- Actualización del vector $\phi(k-1)$.
- Determinación del vector $\theta(k)$, mediante el algoritmo de proyección.
- Determinación de la nueva ley de control.

4. Pruebas y resultados

4.1. Configuración experimental

El diagrama del sistema de pruebas se presenta en el diagrama 4¹.

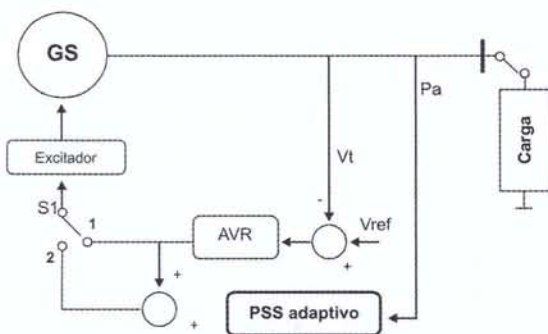


Diagrama 4. Configuración del sistema

¹ La implementación del sistema de prueba se realizó utilizando máquinas a escala del laboratorio de máquinas eléctricas del programa de Ingeniería Eléctrica de la Universidad Tecnológica de Pereira (Colombia).

El sistema consta de un generador síncrono (GS) de 120VA, 220V, 60 Hz, 0,33A. La tensión del campo es controlada por un excitador semicontrolado, que puede ser controlado por la señal recibida sólo del AVR, cuando el interruptor S1 está en la posición 1, o por el aporte del AVR y el PSS adaptivo, cuando el interruptor S1 está en la posición 2. Este interruptor permitirá seleccionar la señal que recibe el puente, con el fin de realizar las comparaciones en ambos casos.

El sistema de instrumentación utilizado está compuesto por transductores de voltaje con rango de 0 a 650 Vac con salida de señal de 0 a 10V, y transductores de potencia activa 0 a 1000W, con salida de 4 a 20 mA.

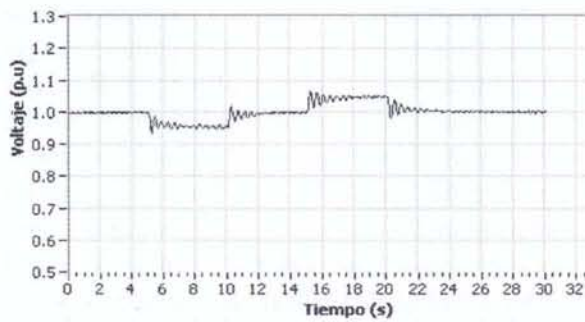
4.2. Tipos de pruebas

Se realizaron varios tipos de pruebas; aquí se presentan las más significativas, que corresponden a la variación de la carga y la tensión de referencia V_{ref} . Los resultados comparativos de los dos tipos de pruebas que utilizan una configuración que sólo incluye el AVR clásico tipo PI y otra que incluye el AVR más el PSS desarrollado se presentan en las gráficas 3, 4, 5 y 6, respectivamente.

4.2.1. Variación en la referencia

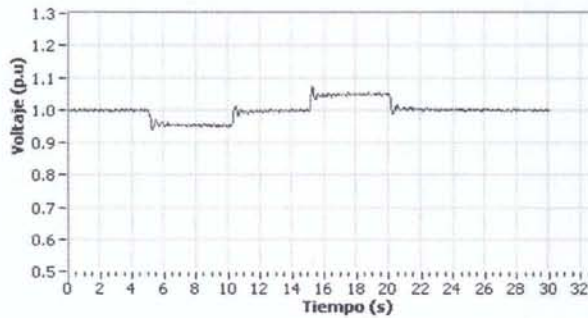
La prueba implementada para verificar la respuesta en los dos sistemas ante variaciones de la tensión de referencia se describe a continuación. Con el generador operando con un voltaje de referencia de 1 p.u. en terminales, su valor se disminuye en un 5% a los cinco segundos. A los 10 segundos se retorna al voltaje de referencia nominal. A los 15 segundos se incrementa el valor de la tensión de referencia en un 5% hasta los 20 segundos, al cabo de los cuales se retorna a la referencia original.

En la gráfica 3 se presenta la respuesta del AVR clásico ante las situaciones anteriormente descritas. Se aprecia que el tiempo utilizado por este controlador para alcanzar el estado permanente es de más de 3 segundos, con un sobrepaso máximo del 2%.



Gráfica 3. Variación en la tensión en terminales de la máquina ante la respuesta del AVR clásico

En la gráfica 4 se presenta la respuesta del PSS adaptativo, en la que es notable la velocidad de respuesta del controlador con respecto al anterior; en este caso el estado permanente se alcanza en 1,5s, aproximadamente.



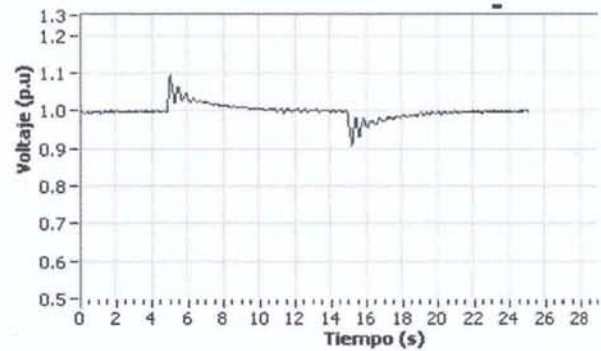
Gráfica 4. Variación en la tensión en terminales de la máquina ante la respuesta del PSS adaptativo

4.2.2. Variación en la carga

Para verificar la respuesta de los dos sistemas ante variaciones en la potencia de la carga se desarrolló la prueba que a continuación se describe. Con el generador operando con un voltaje de referencia de 1 p.u. y con una carga inicial de 86VA a fp 0,93 en atraso; esta última se disminuye bruscamente (34,4% de su valor nominal) a los 5s; luego, a los 15s, se incrementa para alcanzar su valor inicial.

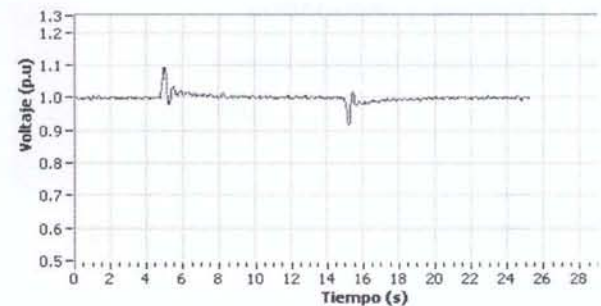
La respuesta en voltaje entregada por la máquina síncrona sólo con el AVR se presenta en la gráfica

5; con la configuración completa de AVR y PSS se muestra en la gráfica 6.



Gráfica 5. Variación en la tensión en terminales de la máquina ante la respuesta del AVR

De acuerdo con la gráfica 5, luego de la disminución de la carga sucedida a los 5s se aprecia un aumento oscilante del voltaje en terminales, con una variación máxima del 10% y tiempo de estabilización de aproximadamente 5s. Para el caso del aumento de la carga la situación es similar a la observada en el caso anterior, pero considerando la disminución natural en el valor del voltaje de la máquina.



Gráfica 6. Variación en la tensión en terminales de la máquina ante la respuesta del PSS adaptativo

Para la misma circunstancia de variación de carga, en la gráfica 6 se muestra que el PSS reduce el tiempo de estabilización, para la remoción y la adición de carga al sistema. En ambos casos el tiempo es de aproximadamente 1s, lo que muestra la eficiencia de la implementación aquí presentada, para evitar posibles oscilaciones en el sistema de potencia.

5. Conclusiones

En este trabajo se presentaron los resultados obtenidos en un montaje con una máquina real al implementar un estabilizador de sistema de potencia auto-sintonizado. El estabilizador y el regulador automático de voltaje ayudan a reducir el tiempo de estabilización de la señal de tensión ante per-

turbaciones causadas a la máquina síncrona en su voltaje de referencia y en la carga.

Los resultados presentados ante tales variaciones muestran la validez de la implementación propuesta. Mediante la implementación de este tipo de controles se brindan soluciones efectivas que ayudan a mantener la calidad de la potencia suministrada al usuario final.

Referencias bibliográficas

- [1] Gellings C. (2002). "Power Delivery System of the Future". *Power Engineering Review, IEEE*, Vol. 22 (12), pp. 7-12.
- [2] Jaimes, Duarte and Ordóñez. (2004). *La calidad de la energía eléctrica en el sector eléctrico colombiano: utopía o realidad*. II Congreso Internacional de la Región Andina, Andescon IEEE, Colombia.
- [3] Crozier and Wisdom (1999). "A power Quality and Reliability Index Based on Customer Interruption Costs". *Power Engineering Review, IEEE*. Vol. 19 (4), pp. 59-65.
- [4] De Mello and Laskowski. (1979). "Concepts of Power System Dynamic Stability". *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, Vol. PAS-94, pp. 827-833.
- [5] Anderson and Fouad. (1977). *Power Systems Control and Stability*. Iowa State Univ. Press, Ames.
- [6] Kundur. (1993). *Power System Stability and Control*. New York, Ed. McGraw Hill, Inc.
- [7] Paucar and Rudnick. (1997). *El estabilizador de potencia en el amortiguamiento de las oscilaciones electromecánicas en sistemas eléctricos multimáquina*. X Conimera, Lima.
- [8] Viljamaa and Koivo. (1995). *Fuzzy Logic in PID Gain Scheduling*. Third European Congress on Fuzzy and Intelligent Technologies EUFIT, Germany.
- [9] Levin and Narendra. (1996). "Control of Nonlinear Dynamical Systems Using Neural Networks –Part II: Observability, Identification and Control". *IEEE Trans on Neural Networks*, Vol. 7 (1), pp. 30-42.
- [10] Mao, Fan, Malik and Hope. (1992). "Studies of Real-Time Adaptive Optimal Excitation Controller and Adaptive Optimal Power System Stabilizer". *IEEE Transactions on Energy Conversion*, Vol. 7 (3), pp. 216-225.
- [11] Hsu and Liou. (1987). *Design of Self-tuning PID Power System Stabilizers for Synchronous Generators*. IEEE Trans. On EC, pp. 343-348.
- [12] Gu and Bollinger. (1991). *A Self-tuning Power System Stabilizer for Wide Range Synchronous Generator Operation*. IEEE Trans on Power Systems, pp. 1191-1199.
- [13] Buamud and Shamekh. (2002). *A Comparative Study between the Performance of the Fixed Gain PID and the Adaptive Self-tuning Power Systems Stabilizers*. Power System Technology, 2002. Proceedings. Power-Con 2002. International Conference on, Vol. 2, pp. 1233-1238.
- [14] De Mello and Concordia. (1969). "Concepts of Synchronous Machine Stability as Affected by Excitation Control" *IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems*, Vol. Pas-88 (4), pp. 316-329.
- [15] ICONTEC. (1999). *Máquinas eléctricas rotatorias. Métodos para determinar mediante ensayos las magnitudes de máquinas síncronas*. Norma Técnica NTC 1515
- [16] He and Malik. (1997). "An Adaptive Power System Stabilizer Based on Recurrent Neural Networks". *IEEE Trans. On Energy Conversion*, Vol. 12 (4), pp. 413-418.
- [17] Zhang, Chen, Malik and Hope. (1993). "An Artificial Neural Network Based Adaptive Power System Stabilizer". *IEEE Trans. On Energy Conversion*, Vol. 8 (1), pp. 71-77.
- [18] Shamsollahi and Malik. (1999). "Real-Time Implementation and Experimental Studies of a Neural Adaptive Power System Stabilizer". *IEEE Trans. On Energy Conversion*, Vol. 14 (3), pp. 737-742.
- [19] Liu, Venayagamoorthy and Wunsch. (2003). "Adaptive Neural Network Based Power System Stabilizer

- Design". *IEEE Trans. On Energy Conversion*, pp. 2970-2975.
- [20] Ruhua, Eghbali and Nehrir. (2003). "An Online Adaptive Neuro-Fuzzy Power System Stabilizer for Multimachine Systems". *IEEE Trans. On Power Systems*, Vol. 18 (1), pp. 128-135.
- [21] Pérez y Alzate. (2005). "Métodos de control utilizados en la implementación de estabilizadores de sistemas de potencia". *Revista Scientia et Technica*, abril (27), pp. 23-28.
- [22] Wankeue, Kanwa, Dai-Do and Keyhani. (1999) "Iteratively Reweighted Least Square for Maximum Likelihood Identification of Synchronous Machine Parameters from On Line Tests". *IEEE Trans. Energy Conversion*, Vol. 14, pp. 159-166.
- [23] Goodwin and Sing. (1984). *Adaptive Filtering Prediction and Control*. New Jersey, Prentice Hall.
- [24] Frohr and Ortttenburger. (1982). *Introduction to Electronic Control Engineering*. London, England, Heyden & Son Ltd.
- [25] Pérez S. (2005). *Control de oscilaciones en la máquina síncrona utilizando un estabilizador neuronal*. Proyecto de grado Maestría en Ingeniería Eléctrica, Universidad Tecnológica de Pereira
- [26] Shamsollahi and Malik. (1996). "On Line Identification of Synchronous Generator Using Neural Networks". *Proc. Can. Conf. Elect. Comput. Eng.*
- [27] Levin and Narendra. (1993). "Control of Nonlinear Dynamics Systems Using Neural Networks: Controllability and Stabilization". *IEEE Trans on Neural Networks*, Vol 4 (2), pp. 192-206.
- [28] *Test Procedures for Synchronous Machines, Part I – Acceptance and Performance Testing, Part II – Test Procedures and Parameter Determination for Dynamics Analysis*