

Modelo de PSS y AVR basado en lógica difusa para un generador sincrónico conectado a un sistema de potencia

Marco Gerardo Torres Andrade*

Resumen

En este artículo se propone un modelo para el control de la excitación de un generador sincrónico conectado a un sistema de potencia mediante un Power System Stabilizer (PSS) y un Automatic Voltage Regulator (AVR) basados en lógica difusa. Inicialmente, se hace una descripción de lo que es un sistema de control de la excitación, y del papel que el PSS y el AVR cumplen dentro de este sistema. Más adelante, se muestran los parámetros de diseño para estos dos dispositivos basados en lógica difusa. Luego, se presentan los resultados de la simulación realizada ante una variación de la potencia mecánica y se evalúan los resultados obtenidos en comparación con la respuesta esperada de este sistema. Se observan, también, las ventajas que la lógica difusa ofrece para la solución de este tipo de problemas.

Palabras Clave: Lógica difusa, Estabilidad dinámica, Sistemas de potencia, Power System Stabilizer (PSS), Automatic Voltage Regulator (AVR)

Abstract

This article proposes a model for the control of the excitement from a connected synchronous generator to a system of power by means of a Power System Stabilizer (PSS) and an Automatic Voltage Regulator (AVR) based on diffuse logic. Initially a description is made of what is a system of control of the excitement, and of the paper that the PSS and the AVR complete inside this system. Next the

* Ingeniero electricista de la Universidad Nacional de Colombia. Actualmente adelanta sus estudios de magíster en Ingeniería de Sistemas en la Universidad Nacional de Colombia, docente de tiempo completo de la Universidad de Cundinamarca, sede Fusagasugá. Correo electrónico: marcogerardo@hotmail.com.

design parameters are shown for these two devices based on diffuse logic. Then the results of the simulation are presented carried out before a variation of the mechanical power and the results are evaluated obtained in comparison with the prospective answer of this system. They are also observed the advantages that the diffuse logic offers for the solution of this type of problems.

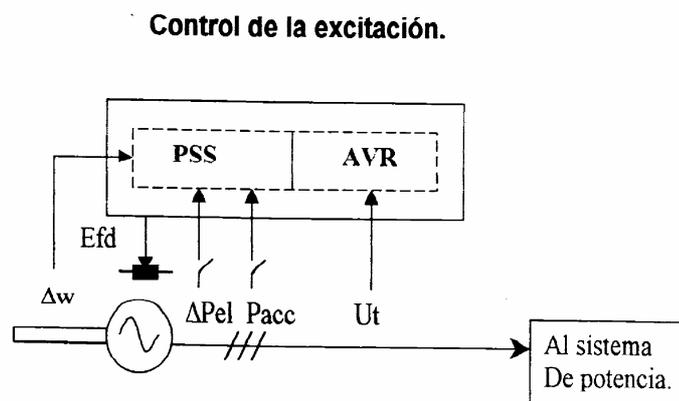
Keywords: Diffuse logic, dynamic Stability, Systems of power, Power System Stabilizer (PSS), Automatic Voltage Regulator (AVR)

Introducción

Desde hace algunas décadas, la determinación de la estabilidad dinámica de los sistemas de potencia ha sido un problema que ha recibido gran atención; ello se debe, entre otros factores, al aumento de tamaño en las unidades de generación y al uso de sistemas de excitación de alta velocidad.

Una de las alternativas planteadas para solucionar este inconveniente consiste en la implementación, en cada unidad generadora, de un sistema de control cuya configuración se muestra en la Figura 1.

Figura 1. Diagrama simplificado del sistema de control con PSS y AVR



Fuente: Alzate GAlfonso. Control suplementario de un generador sincrónico con lógica difusa. Scientia et Técnica 1997 junio (5). pp. 45-50.

El sistema realiza el control del voltaje de excitación en el campo (Efd) del generador sincrónico, de forma tal que, mediante esta señal, se tiene el control de otras variables dinámicas que se presentan en la máquina. Éste consta de dos dispositivos fundamentales:

- El regulador automático de voltaje (AVR, Automatic Voltage Regulator), el cual se encarga de realizar un control dinámico sobre el voltaje de salida del generador; un AVR debe ser capaz de responder rápidamente ante variaciones súbitas en dicho voltaje, produciendo su efecto correspondiente en la excitación del generador. Ello hace que, por su rapidez en la respuesta, se presenten efectos oscilatorios que afectan el funcionamiento de la máquina.
- El estabilizador de sistemas de potencia (PSS, Power System Stabilizer), se encarga de amortiguar los efectos oscilatorios debidos a la operación del AVR y a otras condiciones del sistema; éste produce un par amortiguador en el evento en que se presenten oscilaciones que hagan que se produzca alguna desviación en su velocidad.

Inicialmente, el modelamiento de estos dispositivos se ha basado, fundamentalmente, en la aplicación de técnicas de control tradicional, para lo cual se realiza una linealización del sistema de potencia, y, a partir de su modelo linealizado, se programan tanto el AVR como el PSS, de tal forma que se definen los parámetros que determinan su función de transferencia [1]. Ello hace que su operación sea adecuada para determinado rango alrededor del punto de operación determinado en el modelo; sin embargo, cuando el punto de operación del sistema cambia considerablemente durante su operación, ésta también cambia sustancialmente; ello puede conllevar a un amortiguamiento insuficiente para un nuevo punto de operación, lo cual genera oscilaciones inesperadas y sostenidas de la potencia y el voltaje.

Hoy en día, se cuenta con diferentes tipos de controladores que utilizan técnicas de control más robustas, de forma tal que evalúan las condiciones de funcionamiento del sistema y, de acuerdo con

ellas, determinan las acciones de control adecuadas [2]. Una alternativa de control que puede utilizarse para este fin es la lógica difusa, ésta permite un comportamiento robusto del controlador, debido a la incorporación de un número de reglas tal que cada una de ellas tiene en cuenta una determinada condición de funcionamiento del generador.

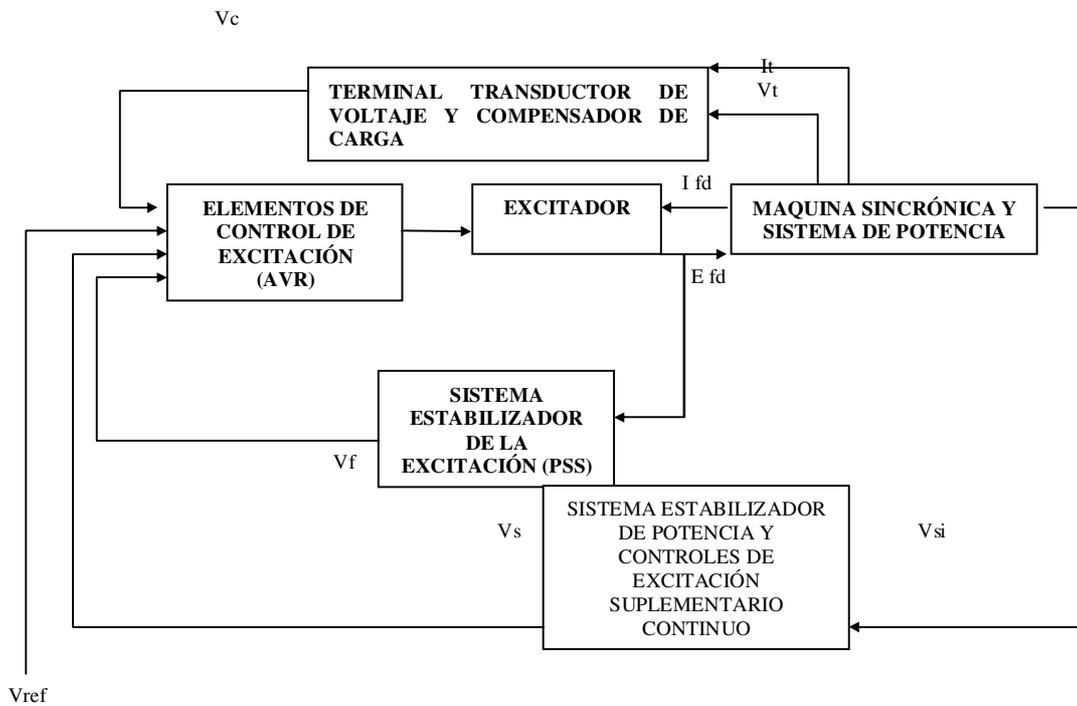
1. El PSS y el AVR en el sistema de excitación

El sistema de excitación es el sistema que suministra y regula la corriente de campo en una máquina sincrónica. En la medida en que la complejidad de los sistemas de potencia ha ido aumentando, se ha convertido en una necesidad cada vez mayor la implementación de modelos para este sistema.

El comité de reporte de la IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers) de 1968 proporcionó una referencia inicial de modelos de sistemas de excitación [3]. Un reporte posterior publicado en la IEEE, "Transactions on Power Apparatus and Systems", en 1981 extendió este trabajo. Finalmente, la norma ANSI/IEEE 421.5 de 1992 [4] adoptó el reporte de 1981, orientando sus trabajos hacia una nueva actualización de los modelos, suministrando características de control adicional y formalizando estos modelos en una práctica recomendada.

El diagrama de bloques funcional propuesto en la norma ANSI/IEEE 421.5 para los sistemas de control de la excitación es el que se muestra en la Figura 2.

Figura 2. Diagrama de bloque funcional general para el sistema de control de la excitación de la máquina síncrona



Fuente: IEEE Energy development and Power Generation. Comité IEEE recommended practice for excitation system models for Power System Stability studies. IEEE std. 421.5; 1992.

Dentro de los componentes del sistema de excitación existen dos que cumplen un importante papel:

1. El Regulador Automático de Voltaje (AVR).
2. El Estabilizador de Sistemas de Potencia (PSS).

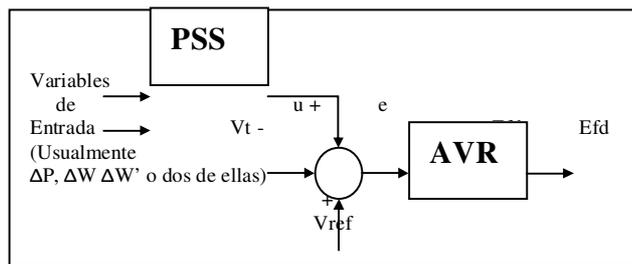
El AVR realiza una acción de control sobre el voltaje de salida en bornes del generador, mientras que el PSS controla los efectos oscilatorios que producen variaciones de la velocidad en la máquina, lo cual afecta ciertas variables como la frecuencia y la potencia generada.

Lo que se busca con estos dispositivos es mantener un control sobre el voltaje (y, en consecuencia, la corriente) de campo del generador (E_{fd}), de tal forma que pueda garantizarse un

control sobre el funcionamiento dinámico de la máquina.

El PSS y el AVR no actúan aisladamente; esto puede observarse en el diagrama de bloques de la Figura 3.

Figura 3. Disposición del PSS y el AVR en el control de la excitación



Fuente: Alzate GAlfonso. Control suplementario de un generador sincrónico con lógica difusa. Scientia et Técnica 1997 junio (5). pp. 45-50.

Mediante elementos sensores, el PSS recibe una o varias entradas (usualmente dos) que se relacionan con la velocidad de la máquina. Lo más común es utilizar la desviación de la potencia eléctrica (ΔP), la desviación de la velocidad angular (ΔW) o la desviación de la aceleración angular ($\Delta W'$). La salida envía una señal estabilizadora (u) que, posteriormente, se suma a la desviación de voltaje ($V_{ref} - V_t$), donde V_{ref} es el voltaje nominal del generador y V_t es el voltaje realmente generado (valores RMS en los terminales de la máquina). Por lo tanto, se establece un error de voltaje (e) que se constituye en la entrada del AVR; su salida corresponde al voltaje de campo (E_{fd}) de la máquina.

Para este trabajo se propone el diseño de un sistema de excitación dispuesto de la forma mostrada en la Figura 3, donde el PSS y el AVR son diseñados con base en lógica difusa.

2. Diseño del PSS basado en lógica difusa

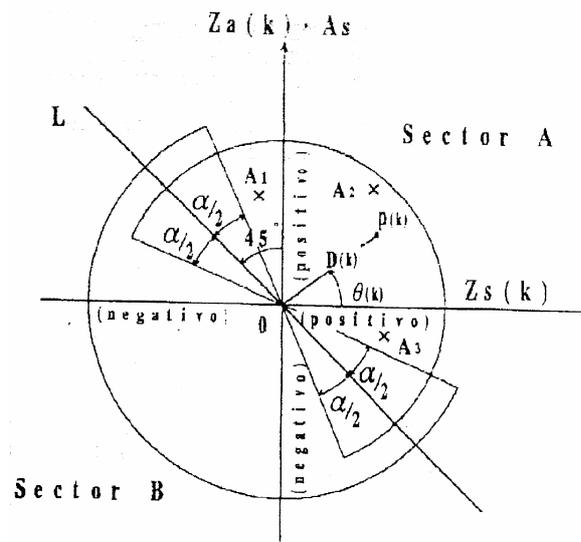
Para el PSS modelado en el presente trabajo, se han considerado dos entradas correspondientes a la desviación de la velocidad angular (ΔW) y la desviación de la aceleración angular ($\Delta W'$) del rotor en

el generador, las cuales pueden calcularse con base en la frecuencia del voltaje AC generado, ya que ésta es proporcional a la velocidad angular.

Por simplicidad en los análisis, se va a considerar un generador de dos polos para la simulación; en tal caso, la velocidad angular de la señal de voltaje es igual a la de giro del rotor.

Las dos variables antes mencionadas se seleccionaron por ser las que mejor representan los efectos oscilatorios en la velocidad del generador. Con base en ellas, se puede definir el estado de la máquina mediante un plano de fase velocidad-aceleración, el cual se aprecia en la Figura 4.

Figura 4. Plano de fase. Velocidad-aceleración



Fuente: Alzate GAlfonso. Control suplementario de un generador sincrónico con lógica difusa. Scientia et Técnica 1997 junio (5). pp. 45-50.

El plano de fase consta de dos ejes: $Zs(k)$, que corresponde a la velocidad, y $Za(k)$, que corresponde a la aceleración, la cual se multiplica por un factor de escala As . El origen de este plano

corresponde al punto de equilibrio deseado. El plano se divide en dos regiones características, *A* y *B*. De acuerdo con la posición del punto en el plano se definen unas reglas de control; a continuación se ilustran las reglas para los puntos *A1*, *A2* y *A3* en el sector *A* y sus correspondientes en el sector *B*:

- En el punto *A1* debe aplicarse una leve desaceleración para prevenir el cambio en la velocidad, debido a la desviación de aceleración positiva, hacia el primer cuadrante.
- En el punto *A2* debe aplicarse una fuerte desaceleración, pues su desviación de velocidad es positiva y su aceleración es aún positiva también.
- En el punto *A3* debe aplicarse una leve desaceleración con el fin de contribuir a la desaceleración presente en la máquina, para hacer tornar la velocidad más rápidamente hacia el punto de equilibrio.
- En el sector *B*, todos los casos anteriores son opuestos a los del sector *A*.

La salida de este controlador corresponde a la señal estabilizadora (*u*) que se sumará a la desviación de voltaje para constituir el error que será la entrada para el AVR.

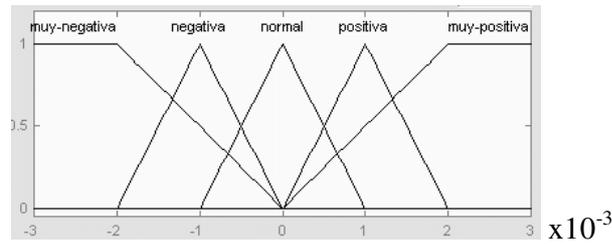
Las reglas descritas anteriormente no fueron las que se tomaron para el diseño del controlador difuso; éstas más bien sirvieron como base de conocimiento para comprender el comportamiento que debe adoptar el sistema de control; a partir de este conocimiento, se empezó a construir el diseño particular de PSS propuesto en este trabajo.

Lo primero que se determinó fue el rango de desviación de velocidad en el cual debe operar el sistema de control, y definir, de esta manera, el universo de discurso para las variables de entrada del PSS. Este rango se estableció con base en información suministrada por el Centro Regional de Despacho de la Empresa de Energía de Bogotá, sobre los niveles de frecuencia permitidos en transmisión de energía eléctrica en el sistema interconectado colombiano. De acuerdo con esta fuente, se acepta un margen de frecuencias entre 59,79 y 60,25 Hz, es decir, una variación de 0,2 Hz por encima y por debajo de la frecuencia nominal. Si se define la frecuencia por unidad (p. u.) como:

$$W_{p.u.} = (2 * \pi * f[\text{Hz}]) / (2 * \pi * 60) \quad (1)$$

Puede definirse para la desviación de velocidad angular un universo de discurso va desde -0,003 p. u. hasta 0,003 p. u. Los conjuntos difusos definidos para esta variable son los que se muestran en la Figura 5.

Figura 5. Conjuntos definidos para la desviación de velocidad como variable de entrada del PSS



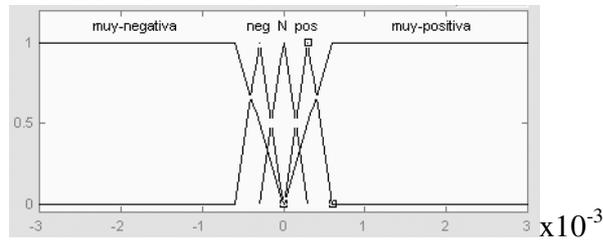
Fuente: Robayo R, Torres Marco. Modelo de PSS y AVR basado en lógica difusa para un generador sincrónico en sistemas de potencia [proyecto de grado]. Universidad Nacional; 1999.

Para la variación de la aceleración angular, se toma la aceleración en cada intervalo de tiempo i como:

$$W'(i) = [W(i) - W(i-1)] / dt \quad (2)$$

Siendo dt la duración del intervalo i . Los límites para el universo de discurso de esta variable se adoptaron de forma tal que permitieran una variación de frecuencia de 0,2 Hz en 1 oscilación; de esta forma, se determinó entre -0,003 y 0,003 p. u. Los conjuntos se definieron de la forma como se observa en la Figura 6.

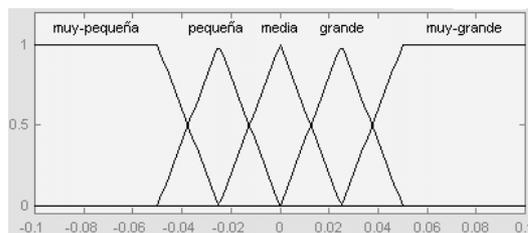
Figura 6. Conjuntos definidos para la desviación de aceleración como variable de entrada del PSS



Fuente: Robayo R, Torres Marco. Modelo de PSS y AVR basado en lógica difusa para un generador sincrónico en sistemas de potencia [proyecto de grado]. Universidad Nacional; 1999.

Para la salida del PSS, que es la señal estabilizadora, se adoptó como universo de discurso el rango de valores propuesto en la bibliografía técnica [5] para los bloques limitadores en los PSS más comúnmente utilizados, el cual va desde -0,1 hasta 0,1 p. u. Los conjuntos difusos definidos para esta variable se aprecian en la Figura 7.

Figura 7. Conjuntos definidos para la variable de salida del PSS



Fuente: Robayo R, Torres Marco. Modelo de PSS y AVR basado en lógica difusa para un generador sincrónico en sistemas de potencia [proyecto de grado]. Universidad Nacional; 1999.

3. Conjunto de reglas implementado para el PSS

La base de reglas del PSS consta de 25 reglas que reflejan el comportamiento derivado del análisis observado en el plano de fase velocidad-aceleración, visto anteriormente. Estas reglas se aprecian en la Tabla 1.

Tabla 1. Base de reglas para el PSS propuesto

Si desviación velocidad	Y variación aceleración	Entonces señal estabilizadora
Muy negativa	Muy negativa	Muy grande
	Negativa	Muy grande
	Normal	Muy grande
	Positiva	Muy grande
	Muy positiva	Muy grande
Negativa	Muy negativa	Grande
	Negativa	Grande
	Normal	Grande
	Positiva	Grande
	Muy positiva	Grande
Normal	Muy negativa	Grande
	Negativa	Grande
	Normal	Media
	Positiva	Pequeña

	Muy positiva	Pequeña
Positiva	Muy negativa	Pequeña
	Negativa	Pequeña
	Normal	Pequeña
	Positiva	Pequeña
	Muy positiva	Pequeña
Muy positiva	Muy negativa	Muy pequeña
	Negativa	Muy pequeña
	Normal	Muy pequeña
	Positiva	Muy pequeña
	Muy positiva	Muy pequeña

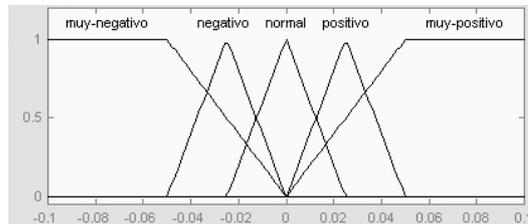
Fuente: Robayo R, Torres Marco. Modelo de PSS y AVR basado en lógica difusa para un generador sincrónico en sistemas de potencia [proyecto de grado]. Universidad Nacional; 1999.

4. Diseño del AVR basado en lógica difusa

La variable de entrada del AVR es el error de voltaje de salida del generador en p. u.; el universo de discurso se definió con base en los niveles de desviación de voltaje aceptados para la transmisión de energía en el sistema interconectado colombiano. Esta información fue suministrada por el Centro Regional de Despacho de la Empresa de Energía de Bogotá. Se permite un margen de 3% para este parámetro, lo cual determina el universo de discurso entre -0,03 y 0,03 p. u.

Se establecieron cinco conjuntos difusos, los cuales definen términos del lenguaje que describen, de una forma completa, las posibles condiciones de error de voltaje. Dichos conjuntos pueden observarse en la Figura 8.

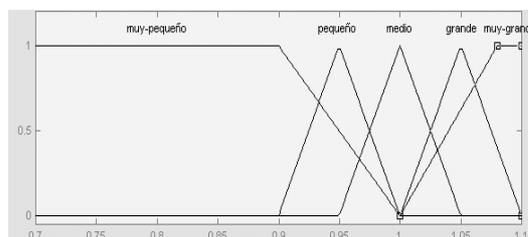
Figura 8. Conjuntos definidos para la variable de entrada del AVR



Fuente: Robayo R, Torres Marco. Modelo de PSS y AVR basado en lógica difusa para un generador sincrónico en sistemas de potencia [proyecto de grado]. Universidad Nacional; 1999.

La salida determinada para este regulador es el voltaje de campo en p. u. El universo de discurso se definió con base en información suministrada por Emgesa, sobre las características de las unidades generadoras de Termozipa, las cuales son muy similares a las de la máquina modelada para esta simulación. Los sistemas de excitación de dichas máquinas trabajan niveles de voltaje de campo entre el 70 y el 110% de su valor nominal. Por lo tanto, el universo de discurso va de 0,7 a 1,1. Los conjuntos difusos se definieron como se muestra en la Figura 9.

Figura 9. Conjuntos definidos para la variable de salida del AVR



Fuente: Robayo R, Torres Marco. Modelo de PSS y AVR basado en lógica difusa para un generador sincrónico en sistemas de potencia [proyecto de grado]. Universidad Nacional; 1999.

5. Conjunto de reglas implementado para el AVR

La base de reglas del AVR es muy sencilla; consta de cinco reglas elementales [2] que se ilustran en la Tabla 2.

Tabla 2. Base de reglas para el AVR propuesto

Si el error de voltaje es	Entonces el voltaje de campo es
Muy negativo	Muy pequeño
Negativo	Pequeño
Normal	Medio
Positivo	Grande
Muy positivo	Muy grande

Fuente: Robayo R, Torres Marco. Modelo de PSS y AVR basado en lógica difusa para un generador sincrónico en sistemas de potencia [proyecto de grado]. Universidad Nacional; 1999.

6. Simulación y análisis de resultados con variación de la potencia mecánica

El modelo de sistema de control de la excitación desarrollado en este trabajo se simuló sobre un generador conectado a un sistema de potencia propuesto para tal fin, al cual se le presentaron dos tipos diferentes de eventos:

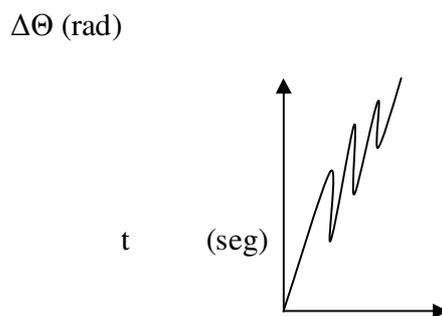
- Variación de la potencia mecánica.

- Cortocircuito sobre la máquina.

Los detalles de las simulaciones realizadas pueden encontrarse en el documento realizado para este trabajo [2]. En este artículo, se mostrará la primera de ellas. Se presenta esta simulación con el fin de poder respaldar el funcionamiento del controlador difuso mediante una prueba confiable, de aplicación en los artículos técnicos sobre el tema. Una referencia común al respecto la ofrecen De Mello y Concordia [6], en la cual realizan un análisis del problema de la estabilidad de una máquina sincrónica conectada a un gran sistema de potencia mediante una reactancia externa, y propone, como perturbación para el estudio, una variación de la potencia mecánica. De acuerdo con este estudio, se observa el siguiente comportamiento:

- En estado estacionario, la frecuencia de la máquina se mantiene en su valor nominal y no se presenta aceleración, por lo cual no existe desviación angular en el rotor.
- Al incrementarse la potencia mecánica se produce una aceleración de la máquina, lo cual se va a manifestar en un incremento de la desviación angular; el comportamiento que De Mello y Concordia presentan para este fenómeno se observa en la Figura 10.

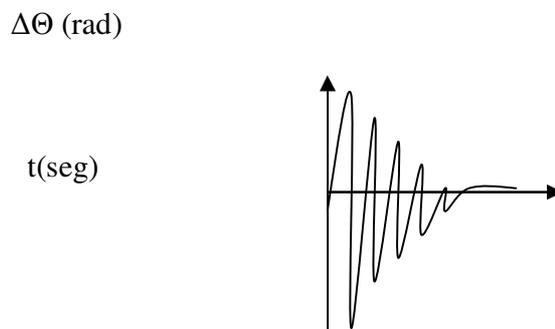
Figura 10. Desviación angular del rotor con un incremento tipo escalón de la potencia mecánica



Fuente: Robayo R, Torres Marco. Modelo de PSS y AVR basado en lógica difusa para un generador sincrónico en sistemas de potencia [proyecto de grado]. Universidad Nacional; 1999.

- El efecto del sistema de control de la excitación ante el incremento de la potencia mecánica debe ser, mediante la excitación del devanado de campo, producir un par desacelerante en la máquina; en la gráfica de desviación angular este fenómeno se manifiesta como una convergencia de la gráfica después de un tiempo, de la forma como se muestra en la Figura 11.

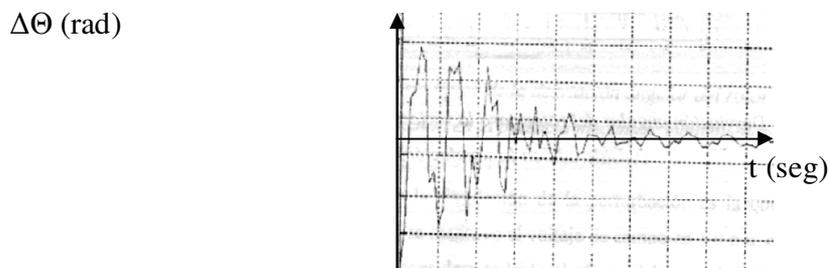
Figura 11. Desviación angular del rotor ante la respuesta del sistema de control de la excitación



Fuente: Robayo R, Torres Marco. Modelo de PSS y AVR basado en lógica difusa para un generador sincrónico en sistemas de potencia [proyecto de grado]. Universidad Nacional; 1999.

La simulación fue realizada en MATLAB, y el resultado de desviación angular obtenido con el controlador difuso fue el que se observa en la Figura 12.

Figura 12. Desviación angular del rotor obtenida en la simulación con el sistema de control de excitación basado en lógica difusa



Fuente: Robayo R, Torres Marco. Modelo de PSS y AVR basado en lógica difusa para un generador sincrónico en sistemas de potencia [proyecto de grado]. Universidad Nacional; 1999.

Puede apreciarse que se presenta una gran similitud entre la gráfica teórica típica y la obtenida en la simulación. Las variaciones discontinuas que presenta esta última gráfica se deben al modelamiento no lineal de los componentes de la máquina implementada y al método numérico utilizado para el desarrollo de la simulación.

Conclusiones

De los resultados obtenidos en la elaboración del trabajo para observar el comportamiento del sistema de control de la excitación con PSS y AVR diseñado con lógica difusa se lograron obtener, entre otras, las siguientes conclusiones relativas al funcionamiento de este sistema de control:

- El sistema de control de la excitación con PSS y AVR basado en lógica difusa presentó un comportamiento bastante robusto; ello se evidenció en el hecho de que las perturbaciones implementadas produjeron efectos oscilatorios poco severos para los márgenes tenidos en cuenta para la simulación.
- Se observó que el sistema de control basado en PSS y AVR con lógica difusa presenta grandes ventajas respecto a otros sistemas de control de la excitación. algunas de ellas son: sencillez en la implementación, bajo requerimiento computacional y facilidad en la actualización de sus parámetros de operación.
- El sistema presentó un comportamiento satisfactorio ante la variación de potencia mecánica adoptada en la simulación; los resultados obtenidos son consistentes con los esperados de acuerdo con la bibliografía.

Con los resultados que presenta la aplicación de la lógica difusa en la solución de este tipo de problemas se plantean nuevas perspectivas en el campo de las técnicas de control moderno aplicadas a los sistemas de potencia que vale la pena abordar en profundidad. Es necesario proponer prácticas recomendadas tanto para la implementación de tales sistemas, como para la aplicación de pruebas

técnicas necesarias para la evaluación de su desempeño dinámico, que aún no existen. Las metodologías presentes hasta el momento no son aptas para el diseño y evaluación de sistemas de control con las características de robustez y adaptabilidad que la lógica difusa ofrece, por lo tanto, se abre una gran área de investigación de gran interés para la ingeniería eléctrica.

Referencias bibliográficas

- [1] IEEE Excitation Systems Subcomitee. Guide for identification, testing and evaluation of the dynamic performance of excitation control systems. IEEE Std. 421.2; 1990.
- [2] Robayo R, Torres Marco. Modelo de PSS y AVR basado en lógica difusa para un generador sincrónico en sistemas de potencia [proyecto de grado]. Universidad Nacional; 1999.
- [3] IEEE Comité Report: (1968, June) Computer representation of excitation system. IEEE Trans PAS, 1968 junio (87). pp. 1460-1464.
- [4] IEEE Energy development and Power Generation. Comité IEEE recommended practice for excitation system models for Power System Stability studies. IEEE std. 421.5; 1992.
- [5] Anderson PM. Power System Control and Stability. Appendix D. The Iowa State University Press, Ames: Iowa, USA; 1992.
- [6] Demello F, Concordia C. Concepts of Synchronous Machine as affected by Excitation Control. IEEE Transactions On Power Apparatus and Systems; abril 1969. pp. 189-202.
- [7] Alzate GAlfonso. Control suplementario de un generador sincrónico con lógica difusa. Scientia et Técnica 1997 junio (5). pp. 45-50.