

A Robustness Study of Power System Stabilizers using Dynamic Modeling

L. Ordaz-Padilla, *Student Member, IEEE*, R. Peña-Gallardo, *Member, IEEE*, and J. Morales-Saldaña

Abstract—A Power System Stabilizer (PSS) is a complementary excitation controller used in the synchronous generator for damping electromechanical oscillations present in an electric power system. The PSS is a dynamic system subject to disturbances and uncertainties, which can lead to unstable system operating conditions. In this paper, a robust stability test is proposed to found the stability bounds for a family of PSS using an unstructured modeling approach. The proposed test is verified using computational simulations. The results obtained show the parameters that are more sensitive to disturbances and that may cause the system to lose stability.

Index Terms—Hydroelectric Generation, Power System Stabilizer, Robust Stability, Unstructured Modeling.

I. INTRODUCCIÓN

En la actualidad, los Sistemas Eléctricos de Potencia (SEP) operan cerca de sus límites técnicos de operación, siendo el límite de estabilidad uno de los más críticos. Para mejorar la estabilidad del SEP se utilizan controladores que actúan sobre los generadores síncronos de las plantas generadoras [1], [2], con ello se mitigan las perturbaciones que ocurren en él durante su operación normal e incluso cuando se encuentra sujeto a perturbaciones, como lo es ante fallas eléctricas.

Uno de estos controladores es el Estabilizador de Sistemas de Potencia (PSS por sus siglas en inglés), el cual fue desarrollado para proveer un amortiguamiento positivo en los generadores síncronos, ya que la rápida acción del regulador automático de voltaje (AVR, por sus siglas en inglés) tiene un impacto negativo en la estabilidad dinámica del SEP [3].

Los elementos que componen a un PSS son [4]: una ganancia que fija el amortiguamiento introducido por el PSS, dos fases de compensación que proporcionan un adelanto de fase característico para compensar el retraso entre la entrada del sistema de excitación y el par del generador eléctrico, un filtro, el cual permite que las señales asociadas con las oscilaciones en la velocidad del rotor no se afecten y un límite de saturación para prevenir que la señal del PSS sature al sistema de excitación [5].

En el estándar IEEE 421.5 [4] se presentan distintos tipos de PSS, tienen una a dos entradas, las cuales son dependientes de la velocidad, la frecuencia o la potencia. En todos los casos, el

PSS mejora los límites de estabilidad a través de la modulación de la excitación del generador y con esto provee amortiguamiento requerido ante oscilaciones electromecánicas generadas en el rotor debido a torque de sincronización, fallas eléctricas, entre otras [6].

En lo que respecta a estudios de estabilidad aplicados al PSS y su impacto en los SEP, se reportan diversas contribuciones, lo que muestra que es un tópico de interés actual. Por ejemplo, en [7] es presentado un estudio de estabilidad en un SEP considerando los efectos del AVR y el PSS; en [8] se presenta un análisis comparativo de la mejora en la estabilidad de un sistema compuesto por un generador síncrono conectado a un bus infinito utilizando un PSS robusto; mientras que en [9] y [10] se presenta el diseño optimizado de un sistema coordinado AVR-PSS para mejorar la estabilidad transitoria.

También se han reportado estudios en los cuales se mejora la estabilidad del SEP por medio del control del PSS, pero utilizando diferentes enfoques de análisis y optimización. En [11] se utiliza un control PID aplicado al PSS y se estudia la estabilidad del sistema en lazo cerrado; de manera similar a través del control del PSS en [12] y [13] se mejora la estabilidad del SEP, el tipo de control utilizado es Lógica Difusa y un algoritmo de búsqueda, respectivamente. Por otro lado, en [14]-[16] se realizan análisis de cómo los PSS utilizados en generadores alimentados por energías renovables impactan en la estabilidad del SEP.

Es importante tomar en cuenta que la sintonización del PSS es fundamental para mejorar la estabilidad del SEP. Los procesos de sintonización se basan en la naturaleza de las oscilaciones electromecánicas que se deseen amortiguar. Estas pueden ser clasificadas como [17], [18]: oscilaciones en modo intra-planta, oscilaciones en modo local y oscilaciones en modo inter-área. En este sentido se han publicado artículos en los que se reportan procesos de sintonización del PSS, como lo son usando redes neuronales [19], [20], algoritmos genéticos [21] y métodos de optimización [22].

A pesar de que se han reportado artículos acerca del impacto de los PSS en la operación y estabilidad del SEP utilizando diferentes enfoques, desde el uso de herramientas clásicas de control, hasta métodos de optimización. Sin embargo, no se incluyen en los estudios el efecto de las incertidumbres que están presentes en las diferentes partes del sistema bajo estudio. Es por lo que en este artículo se propone una prueba de estabilidad robusta considerando las

L. A. Ordaz-Padilla está en Schweitzer Engineering Laboratories, México, luadorpa@gmail.com.

R. Peña-Gallardo y J. A. Morales-Saldaña están en Universidad Autónoma de San Luis Potosí, México, rafaelpena@uaslp.mx, jmorales@uaslp.mx.

En el caso del PSS1A se representa por una función SISO (Single Input, Single Output por sus siglas en inglés), como se muestra en diagrama de bloques en la Fig. 6; su entrada es la frecuencia angular ω_s y su salida V_{PSS} es la entrada del sistema de excitación. Este PSS es descrito por una función de transferencia que incluye un filtro "wash-out" con constante de tiempo T_w , una ganancia de estabilización K_s , un filtro de segundo orden de atraso-adelanto con constantes de tiempo T_1 y T_2 .

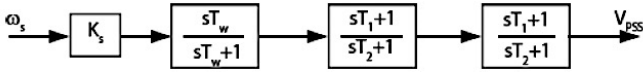


Fig. 6. Modelo del PSS tipo 1A.

Por otro lado, el PSS3B se define por una función de transferencia MISO (Multiple Input, Single Output por sus siglas en inglés), sus entradas son la señal de potencia eléctrica P_e y la frecuencia angular ω_s . El PSS3B es mostrado en la Fig. 7. Este PSS esta provisto por una función de transferencia de un transductor por cada entrada con constantes de tiempo T_1 y T_2 , un filtro "wash-out" por cada entrada, así como por las constantes de tiempo T_{w1} , T_{w2} y T_{w3} .

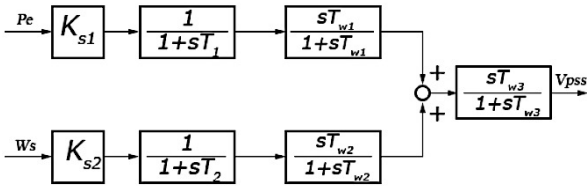


Fig. 7. Modelo del PSS tipo 3B.

La entrada y salida en lazo abierto son seleccionadas del sistema de prueba de la Fig. 1, esto excluyendo al PSS, para posteriormente linealizar el modelo usando la herramienta de análisis lineal de MATLAB contenida en la versión estudiantil 2018b. Los parámetros del sistema de prueba pueden consultarse en [30] y [31]. Con lo anterior se obtiene una función de transferencia de grado 26, en donde para el caso SISO se tiene como entrada $V_{SUP}(s) = V_{REF}(s) + V_{PSS}(s)$ y como salida $\Delta\alpha(s)$; mientras que para el caso SIMO, se tiene la misma entrada y como salidas $P_e(s)$ y $\Delta\alpha(s)$.

III. MODELADO DE INCERTIDUMBRES

En el análisis de sistemas dinámicos, la presencia de incertidumbres juega un papel vital sobre las características de estabilidad y desempeño. Por lo tanto, el modelo de la incertidumbre es crucial para determinar la robustez en cualquier sistema. Para el caso de sistemas lineales invariantes en tiempo, las técnicas de modelado estructurado y no estructurado son muy utilizadas [32], [33]. En el presente trabajo es empleado el modelado no estructurado para modelar las incertidumbres en los parámetros del PSS.

En la Fig. 8 se muestra el esquema de un sistema de control retroalimentado utilizado para el PSS1A, en donde la planta es modelada bajo un enfoque no estructurado del tipo aditivo, donde K es el controlador estabilizante para la planta nominal

P_0 , Δ es la incertidumbre y se encuentra acotada por $\|\Delta\|_\infty \leq 1$ y W_2 corresponde a una función de peso que caracteriza a la familia de plantas, la cual es definida como,

$$P = P_0 + \Delta W_2 \quad (1)$$

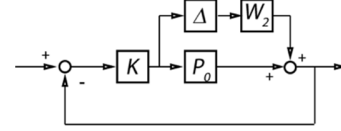


Fig. 8. Modelado aditivo de incertidumbre tipo SISO.

Otro modelo ampliamente utilizado para representar las incertidumbres bajo el enfoque no estructurado es el multiplicativo, el cual es mostrado en la Fig. 9. En donde es considerado un sistema de control típico y se incorporan las incertidumbres.

La familia de plantas en el modelado multiplicativo es caracterizada como,

$$P = P_0(1 + \Delta W_2) \quad (2)$$

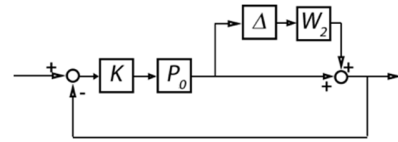


Fig. 9. Modelado multiplicativo de incertidumbre tipo SISO.

Para el caso del PSS3B, al estar representado como un sistema MISO se requieren dos funciones de peso para definir a la incertidumbre [32]. Lo anterior quiere decir que los sistemas mostrados en las Figs. 8 y 9 deben ser modificados para incluir a estas funciones de peso. En la Fig. 10 se muestra como queda definido el sistema en lazo cerrado utilizando modelado aditivo de incertidumbre del tipo MISO y en (3) se da su definición en forma matricial.

$$\begin{bmatrix} P_1 & P_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P_{01} & P_{02} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} W_1 & W_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta & 0 \\ 0 & \Delta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} W_2 & 0 \\ 0 & W_2 \end{bmatrix} \quad (3)$$

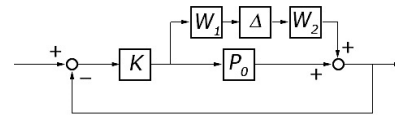


Fig. 10. Modelado aditivo de incertidumbre tipo MISO.

Una vez definidos los modelos utilizados para incorporar las incertidumbres en los parámetros de los PSS, se realiza el estudio de robustez sobre la estabilidad del sistema ante variaciones en los parámetros del PSS. Para este fin se requiere utilizar el concepto del Teorema de Pequeña Ganancia, el cual es definido a continuación.

Considere el marco general de análisis robusto mostrado en la Fig. 11 y asumiendo que $M \in RH_\infty$ y $\Delta \in RH_\infty$, además de que $\gamma \in \Re$, con $\gamma > 0$, entonces se establece que el sistema interconectado es estable si y solo si:

- 1) $\|\Delta\|_\infty \leq 1/\gamma$, sí y solo sí $\|M\|_\infty < \gamma$
- 2) $\|\Delta\|_\infty < 1/\gamma$, sí y solo sí $\|M\|_\infty \leq \gamma$

Este resultado es primordial para determinar la estabilidad robusta del PSS en un escenario de modelado no estructurado, siendo este un enfoque atractivo para este caso en particular debido a la complejidad del sistema de prueba.

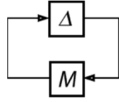


Fig. 11. Marco general de análisis robusto $\Delta - M$.

IV. PSS BAJO MODELADO NO ESTRUCTURADO

A partir de la representación de incertidumbre no estructurada y tomando como base el marco general de análisis robusto, que es de utilidad para determinar la estabilidad robusta del sistema, incluyendo sus parámetros, se establece una variación de $\pm 20\%$ en cada uno de los parámetros que conforman a las funciones de transferencia de cada PSS. Con esto se genera una familia de plantas, en donde la planta nominal de cada PSS es un miembro de esta familia. Entonces se procede a la selección de las funciones de peso que acoten a la familia de plantas y que cumplan con el criterio establecido del Teorema de Pequeña Ganancia, esto es, $|P_0 - P| = |W_x|$, con $\|\Delta\|_\infty \leq 1$. Lo cual permite determinar cuáles son los parámetros más sensibles ante variaciones. En este artículo se considera el agregar los efectos de las incertidumbres bajo dos tipos de modelado no estructurado, esto es, por incertidumbre aditiva y multiplicativa [34]-[36].

A. Incertidumbre Aditiva

En la Tabla I se muestra las expresiones que representan al sistema interconectado M , para la planta nominal P_0 y su controlador estabilizante K , tanto para el PSS1A como el PSS3B bajo modelado no estructurado con incertidumbre aditiva. También se pueden observar las funciones de peso W_x resultantes en cada caso y que se obtienen de los diagramas de bloques mostrados en las Figs. 8 y 9, respectivamente.

B. Incertidumbre Multiplicativa

De manera similar, en la Tabla II se resumen las funciones de peso obtenidas, así como la representación del sistema interconectado para el PSS1A bajo modelado no estructurado con incertidumbre multiplicativa. Es importante mencionar que en esta tabla no se muestran las funciones de peso obtenidas para el PSS3B bajo modelado multiplicativo, esto debido a que el proceso que se sigue es muy similar al PSS1A, tal y como se puede ver en el modelado bajo incertidumbre aditiva utilizando ambos PSS.

V. PRUEBA DE ESTABILIDAD PROPUESTA

Tomando como base la información contenida en las secciones previas, se propone un procedimiento para probar la estabilidad robusta del PSS. La prueba propuesta considera los siguientes pasos:

- 1) Se realiza la representación del sistema interconectado de la Fig. 1, por medio de los modelos de los componentes mostrados en la Sección II. En el caso particular del PSS se sintoniza para amortiguar oscilaciones en el modo local, en el cual el generador síncrono oscila contra el resto del sistema en un rango de frecuencias del orden de 1 a 2 Hz.
- 2) Se asegura que la estabilidad nominal se satisfaga en lazo cerrado. Para esto se utiliza la Teoría presentada en la Sección III.
- 3) Tomando en cuenta la información de la Sección IV, se selecciona el tipo de modelado de incertidumbre (aditivo o multiplicativo) y se procede a realizar la obtención de la familia de plantas útiles para determinar las funciones de peso.
- 4) Utilizando el teorema de pequeña ganancia se determina los límites de estabilidad y con ello los parámetros sensibles a perturbaciones.
- 5) Se comprueba mediante simulaciones en Simulink de MATLAB los límites de estabilidad obtenidos.

TABLA I
EXPRESIONES QUE REPRESENTAN AL SISTEMA INTERCONECTADO CON INCERTIDUMBRE ADITIVA

PSS1A	
Nombre	Valor
Función de peso	$W_2 = \frac{0.24s^2 + 9.238s + 0.007616}{s^2 + 1.276s + 0.0309}$
Sistema interconectado	$M = \frac{W_2 K}{1 + P_0 K}$
$\ M\ _\infty$	0.0145
Valor máximo de la incertidumbre	68.98
PSS3B	
Funciones de peso	$W_1 = \frac{0.1732s}{s^2 + 60s + 1274} \begin{bmatrix} 1 & 1 \end{bmatrix}$ $W_2 = \frac{33.3s}{s^2 + 60s + 1274} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$
Sistema interconectado	$M = \frac{W_1 K W_2}{1 + P_0 K}$
$\ M\ _\infty$	7.9456E-4
Valor máximo de la incertidumbre	1258.6

TABLA II
EXPRESIONES QUE REPRESENTAN AL SISTEMA INTERCONECTADO CON INCERTIDUMBRE MULTIPLICATIVA

Nombre	Valor
Función de peso	$W_2 = \frac{0.21s + 0.02846}{s + 0.06345}$
Sistema interconectado	$M = \frac{W_2 K P_0}{1 + P_0 K}$
$\ M\ _\infty$	0.0135
Valor máximo de la incertidumbre	74.07

VI. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Para verificar los resultados obtenidos de la técnica de análisis propuesta se simulan tres escenarios de estudio tomando como base el sistema de prueba mostrado en la Fig. 1. Estos escenarios son: a) con el sistema trabajando en condiciones nominales y con los controladores en su límite de operación, en este caso se aplica una falla trifásica en las terminales del transformador a los 5 s de simulación, es mantenida por 0.1 s y después es liberada; b) se simula la misma falla trifásica, pero en este caso se varían los parámetros de los PSS de acuerdo con los límites de estabilidad obtenidos con la metodología propuesta; c) finalmente, se simula un cambio de carga considerando una pequeña variación dentro de los parámetros de los PSS, pero ya fuera del límite de estabilidad.

A. Operación Ante un Cortocircuito Trifásico en Condiciones Nominales

Con el fin de comparar los resultados del estudio de estabilidad se obtienen las respuestas del sistema en condiciones nominales de operación sujetos a una perturbación. En la Fig. 12 se muestra la respuesta obtenida de la potencia eléctrica y la velocidad del rotor; en estas se observa como el sistema regresa a su condición de estabilidad después de que la falla trifásica ha sido liberada. Debido a que el PSS3B tiene como entradas las señales de velocidad en el rotor del generador y la potencia eléctrica, la amplitud en los transitorios que se observan en la Fig. 12 es menor al liberarse la falla, a diferencia de los transitorios observados con el PSS1A, donde éste último solo es controlado tomando en cuenta la señal de la velocidad en el rotor del generador. Además, el tiempo en alcanzar el estado estacionario es 1.5 s más rápido utilizando el PSS3B.

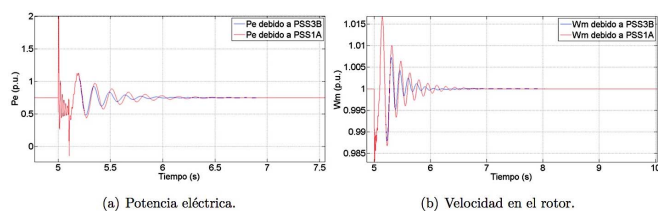


Fig. 12. Respuesta de la potencia eléctrica y velocidad en el rotor ante un cortocircuito trifásico.

B. Operación Ante un Cortocircuito Trifásico con Perturbación en los PSS

En este caso de estudio, ahora se aplican variaciones en aquellos parámetros que se identificaron como los más sensibles ante perturbaciones, esto tomando en cuenta los resultados de la prueba presentada anteriormente.

En el caso del PSS1A, el sistema fue simulado con una variación de 2.7 veces en los parámetros K_s y T_I , siendo estos los valores cercanos al límite de estabilidad, pero mantienen el modo local estable, posteriormente el mismo sistema fue simulado con una variación de 2.8 veces en los mismos parámetros, variación a partir de la cual el sistema es inestable. En la Fig. 13 se puede apreciar el modo inestable, tanto en la potencia eléctrica como en la velocidad de giro del rotor. Las respuestas ante la perturbación al ser liberada la

falla trifásica tienen un comportamiento oscilatorio sobre los valores de referencia con amplitud constante. Por otro lado, el modo estable también presenta un comportamiento oscilatorio, sin embargo, conforme transcurre el tiempo la amplitud del transitorio se mitiga hasta llegar al estado estacionario.

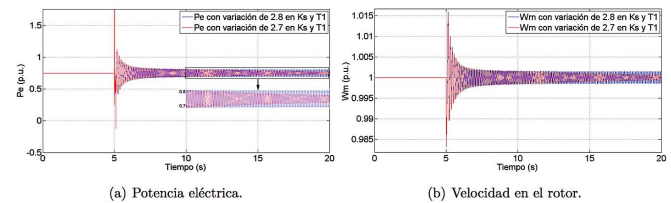


Fig. 13. Respuesta de la potencia eléctrica y velocidad en el rotor ante un cortocircuito trifásico con variaciones en los parámetros K_s y T_I del PSS1A.

Para el caso del PSS3B, se simula el sistema con una variación de 11.08 veces en el parámetro K_{s1} y de 12.14 veces el parámetro K_{s2} , que de acuerdo con el análisis de estabilidad robusta son las variaciones permisibles en los parámetros para las cuales el sistema aún mantiene la estabilidad. De la misma forma el sistema fue simulado con una variación de 11.6 veces el parámetro K_{s1} y de 12.68 veces el parámetro K_{s2} , resultando que con estos valores el sistema tiene una condición de inestabilidad. En la Fig. 14 se pueden observar los resultados obtenidos en estos dos escenarios de operación. Al igual que en el caso del PSS1A se observa el modo estable e inestable de acuerdo con la variación de los parámetros, pero con un mejor desempeño del PSS3B ayudando al sistema a alcanzar una condición de estabilidad de una manera más rápida en el caso del modo estable.

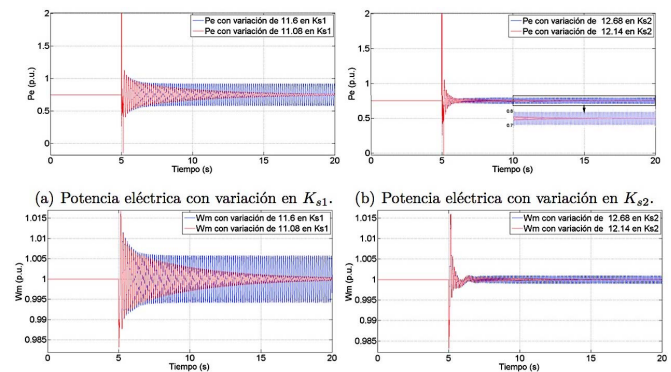


Fig. 14. Respuesta de la potencia eléctrica y velocidad en el rotor ante un cortocircuito trifásico con variaciones en los parámetros K_{s1} y K_{s2} del PSS3B.

C. Operación Ante un Cambio de Carga con Perturbación en los PSS

En este caso de estudio, el sistema ahora es probado ante cambios de carga para los diferentes controladores PSS1A y PSS3B, con el objetivo de comparar sus respuestas y validar el análisis realizado ante perturbaciones no tan severas, como lo es la falla trifásica. La condición consiste en conectar una carga local de 0.9 MW en las terminales del transformador del sistema de la Fig. 1 a partir del tiempo de simulación de 5 s.

Utilizando el PSS1A, el sistema fue simulado con una variación de 2.7 veces en los parámetros K_s y T_I y luego con una variación de 2.8 veces en los mismos parámetros, condición en la cual ya se había determinado en el caso

anterior que el sistema se vuelve inestable. En la Fig. 15 se observa el comportamiento de la potencia eléctrica y la velocidad de giro del rotor del generador, en la cual se puede observar que pesar de que la perturbación no es tan severa, el sistema se vuelve inestable con una variación de parámetros apenas por encima del límite de estabilidad.

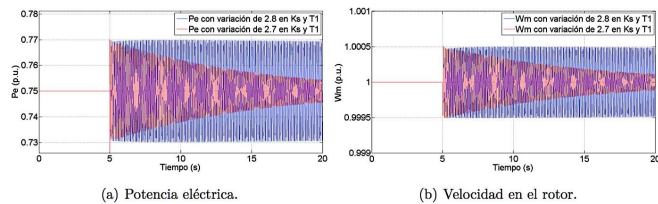


Fig. 15. Respuesta de la potencia eléctrica y velocidad en el rotor ante un cambio de carga con variaciones en los parámetros K_s y T_l del PSS1A.

De manera similar el sistema se simula utilizando el PSS3B, con la variación de parámetros definida en el caso de la falla trifásica. Los resultados obtenidos se muestran en la Fig. 16, tanto para la potencia eléctrica como para la velocidad de giro del rotor. De esta figura se puede observar como seleccionando los valores adecuados de los parámetros, a pesar de que se encuentren cerca del límite de estabilidad, el sistema regresa al estado estacionario una vez liberada la falla; mientras que, si se selecciona un valor en los parámetros más sensibles un poco por encima del límite de estabilidad, ante una perturbación el sistema se vuelve inestable.

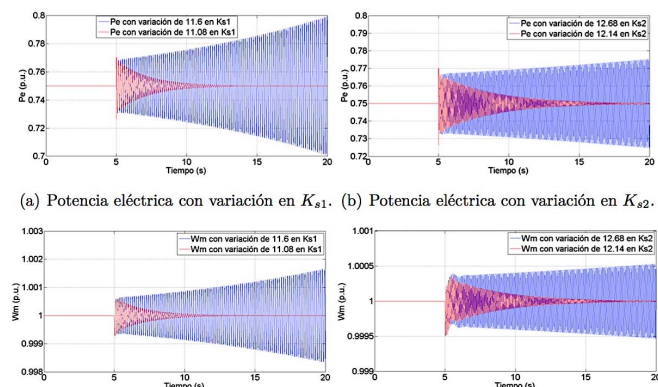


Fig. 16. Respuesta de la potencia eléctrica y velocidad en el rotor ante un cambio de carga con variaciones en los parámetros K_{s1} y K_{s2} del PSS3B.

VII. CONCLUSIONES

En este trabajo se presentó una prueba basada en análisis robusto para determinar los límites de estabilidad de los estabilizadores de sistemas de potencia, en específico el PSS1A y el PSS3B.

A partir del análisis de estabilidad robusta realizado se identificaron los parámetros sensibles a perturbaciones. En el caso del PSS1A es la ganancia de amortiguamiento K_s y la constante de tiempo T_l , concluyendo que se puede tener una variación conjunta de 2.7 veces sobre los valores sintonizados; por otro lado, en el caso del PSS3B los parámetros más sensibles son las ganancias de amortiguamiento K_{s1} y K_{s2} , las cuales soportan una variación de 11.08 veces y 12.14 veces, respectivamente, sobre los valores sintonizados. Concluyendo

del análisis propuesto que estos PSS son robustos ante perturbaciones.

Se realizaron tres casos de estudio para validar los resultados obtenidos de la prueba presentada. En el primer caso se observa que los PSS son capaces de ayudar al sistema a alcanzar el estado estacionario, a pesar de estar sintonizados en sus límites de estabilidad. Posteriormente se presentaron los casos de la aplicación de una falla trifásica y un cambio de carga, en los cuales se puede apreciar el modo estable e inestable cuando los parámetros superan el límite de estabilidad calculado.

La prueba presentada puede servir para identificar los parámetros a sintonizar en un PSS operando inestablemente a partir del análisis de estabilidad robusta, sin necesidad de modificar el valor de los parámetros no sensibles.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a la Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma de San Luis Potosí por las facilidades otorgadas para llevar a cabo esta investigación. Luis Adolfo Ordaz-Padilla agradece al CONACYT por financiar sus estudios de maestría.

REFERENCIAS

- [1] C. Concordia and F. deMello, "Concepts of Synchronous Machine Stability as Affected by Excitation Control," *IEEE Trans*, vol. PAS-88, pp. 316-329, 1969.
- [2] K. Hirayama, and Y. Uemura, "Improvement of power system stability using multivariable excitation control," *Electrical Engineering in Japan*, vol. 117, pp. 43-52, 1996.
- [3] P. Kundur, *Power System Stability and Control*, McGraw Hill, 1994.
- [4] IEEE recommended practice for excitation system models for power system stability studies, IEEE Std 421.5-2005 (Revision of IEEE Std 421.5-1992), 2006.
- [5] M. A. Hassouneh, Hsien-Chiarn Lee, and E. H. Abed, "Washout filters in feedback control: benefits, limitations and extensions," *Proceedings of the 2004 American Control Conference*, vol. 5, pp. 3950-3955, Boston, MA, USA, 2004.
- [6] E. V. Larsen, and D. A. Swann, "Applying Power System Stabilizers Part II: Performance Objectives and Tuning Concepts," *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, vol. PAS-100, no. 6, pp. 3025-3033, 1981.
- [7] R. A. Ramos, "Stability analysis of power systems considering AVR and PSS output limiters," *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 31, no. 4, pp. 153-159, 2009.
- [8] K. A. Haseena, and A. S. Varghese, "Comparative analysis of stability enhancement in SMIB using robust PSS with different controllers," *2013 International Multi-Conference on Automation, Computing, Communication, Control and Compressed Sensing*, pp. 346-351, Kottayam, 2013.
- [9] A. Falehi, M. Rostami, and H. Mehrjadi, "Transient Stability Analysis of Power System by Coordinated PSS-AVR Design Based on PSO Technique," *Engineering*, vol. 3, no. 5, pp. 478-484, 2011.
- [10] J. Morsali, R. Kazemzadeh, M. R. Azizian and H. Morsali, "Novel coordination of dual-channel PSS, AVR and TCSC damping controller to enhance power system overall stability," *20th Iranian Conference on Electrical Engineering (ICEE2012)*, Tehran, 2012, pp. 552-557.
- [11] M. Mahdavian, G. Shahgholian, M. Janghorbani, S. Farazpey, and M. Azadeh, "Analysis and simulation of PID-PSS design for power system stability improvement," *2016 13th International Conference on Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology*, pp 1-6, Chiang Mai, 2016.
- [12] B. Boussahoua, M. Boudour, "Power System Transient Stability Robust control using Fuzzy Logic PSS and Genetic Algorithm," *Journal of Electrical Engineering*, vol. 11, pp. 73-79, 2011.
- [13] N. N. Islam, MA. Hannan, A. Mohamed, and H. Shareef, "Improved Power System Stability Using Backtracking Search Algorithm for

- Coordination Design of PSS and TCSC Damping Controller". *PLoS ONE*, 2016.
- [14] Zi Lan Zhao, Wen Ying Liu, and Xu Bin Han, "Study on Small Signal Stability Improvement by PSS of the Large-Scale Wind Power Integration," *International Journal of Computer and Electrical Engineering*, vol. 5, no. 2, 2013.
- [15] Y. Mishra, S. Mishra, M. Tripathy, N. Senroy and Z. Y. Dong, "Improving Stability of a DFIG-Based Wind Power System With Tuned Damping Controller," *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 24, no. 3, pp. 650-660, Sept. 2009.
- [16] X. Y. Bian, Y. Geng, K. L. Lo, Y. Fu and Q. B. Zhou, "Coordination of PSSs and SVC Damping Controller to Improve Probabilistic Small-Signal Stability of Power System With Wind Farm Integration," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 31, no. 3, pp. 2371-2382, May 2016.
- [17] G. Gajjar, and S. Soman, "Power System Oscillation Modes Identifications: Guidelines for Applying TLS-ESPRIT Method," *International Journal of Emerging Electric Power Systems*, vol. 14, no. 1, pp. 57-66, 2017.
- [18] Bikash Pal, and Balarko Chaudhuri. *Robust Control in Power Systems*. Springer US, 2005.
- [19] R. Segal, A. Sharma, M.L Kothari, "A self-tuning power system stabilizer based on artificial neural network," *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 26, no. 6, pp. 423-430, 2004.
- [20] M.A. Abido, "Simulated annealing based approach to PSS and FACTS based stabilizer tuning," *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 22, no 4, pp. 247-258, 2000.
- [21] A. L. B. Do Bomfim, G. N. Taranto and D. M. Falcao, "Simultaneous tuning of power system damping controllers using genetic algorithms," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 15, no. 1, pp. 163-169, Feb. 2000.
- [22] A. Mendonca and J. A. P. Lopes, "Simultaneous Tuning of Power System Stabilizers Installed in DFIG-Based Wind Generation," *2007 IEEE Lausanne Power Tech, Lausanne*, 2007, pp. 219-224.
- [23] Rafael Peña, Aurelio Medina, Olimpo Anaya-Lara, and James R. McDonald, "Capacity estimation of a minihydro plant based on time series forecasting," *Renewable Energy*, vol. 34, no. 5, pp. 1204-1209, 2009.
- [24] Oliver Paish, "Small hydro power: technology and current status," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 6, pp. 537-556, 2012.
- [25] Acakpovi, Amevi, Essel Ben Hagan, and Francois Xavier Fifatin, "Review of hydropower plant models." *International Journal of Computer Applications*, vol. 108, no. 18, pp. 33-38, 2014.
- [26] M. Saidy, and F.M. Hughes, "Performance improvement of a conventional power system stabilizer," *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 17, no. 5, pp. 313-323, 1995.
- [27] Paul M. Anderson, and A. A. Fouad, *Power System Control and Stability*, Wiley-IEEE Press, 2003.
- [28] "Hydraulic turbine and turbine control models for system dynamic studies," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 7, no. 1, pp. 167-179, 1992.
- [29] S. P. Ghoshal, A. Chatterjee, and V. Mukherjee, *Computational Intelligence in Power Engineering, Chapter Application of Evolutionary Optimization Techniques for PSS Tuning*, Springer Berlin Heidelberg, 2010.
- [30] L. A. Ordaz-Padilla, R. Peña-Gallardo, J. A. Morales-Saldaña and G. Gutiérrez-Urueta, "Uncertainty modeling of a PSS3B Power System Stabilizer," *2016 IEEE International Autumn Meeting on Power, Electronics and Computing (ROPEC)*, Ixtapa, 2016, pp. 1-6.
- [31] L. A. Ordaz-Padilla, R. Peña-Gallardo and J. A. Morales-Saldaña, "Robust stability analysis for a power system stabilizer," *2016 13th International Conference on Power Electronics (CIEP)*, Guanajuato, 2016, pp. 345-349.
- [32] Kemin Zhou, John C. Doyle, and Keith Glover, *Robust and Optimal Control*. Prentice Hall, 1996.
- [33] H. Verdejo, D. Gonzalez, J. Delpiano and C. Becker, "Tuning of Power System Stabilizers using Multiobjective Optimization NSGA II," in *IEEE Latin America Transactions*, vol. 13, no. 8, pp. 2653-2660, 2015.
- [34] Ricardo S. Sanchez-Peña and Mario Sznaiar, *Robust Systems Theory and Applications*, Wiley-Interscience, 1998.
- [35] John Doyle, Bruce Francis and Allen Tannenbaum, *Feedback Control Theory*, Macmillan Publishing Co., 1990.
- [36] Manfred Morari and Evangelos Zafiriou, *Robust Process Control*, Prentice Hall, 1988.



Luis Adolfo Ordaz Padilla (SM'16) recibió el grado de Ingeniero en Energía por parte de La Universidad de la Ciénega del Estado de Michoacán de Ocampo en 2012, posteriormente el grado de Maestro en Ingeniería por parte de la Universidad Autónoma de San Luis Potosí en 2017. Actualmente trabaja para la empresa SEL (Schweitzer Engineering Laboratories).

Sus áreas de interés son las energías renovables y el control automático.



Rafael Peña Gallardo (M'07) nació en Morelia, México en 1979. Recibió el grado de Ingeniero Electricista, Maestro en Ciencias y Doctor en Ciencias por parte de la Facultad de Ingeniería Eléctrica, de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, en Morelia, México, en 2004, 2006 y 2010, respectivamente. Actualmente es

Profesor-Investigador de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma de San Luis Potosí, México. Sus intereses son los sistemas de generación distribuida basados en energías renovables y la aplicación de métodos computacionales en los sistemas de potencia.



Jorge Alberto Morales Saldaña recibió los grados de Ingeniero, Maestro en Ingeniería y Doctor en Ciencias en Ingeniería Eléctrica por parte de la Universidad Autónoma de San Luis Potosí, San Luis Potosí, México, en 1995, 1997 y 1999, respectivamente. Universidad en la cual labora actualmente como Profesor-Investigador. Sus intereses

incluyen el modelado de reguladores conmutados de alta frecuencia, análisis robusto, desarrollo de topologías de convertidores con procesamiento redundante de energía y teoría de control aplicada a electrónica de potencia.