

Método de Residuo en la Sintonización de PSS y Dinámica de los Modos de Oscilación en PowerFactory

José Oscullo Lala
Departamento de Energía Eléctrica
Escuela Politécnica Nacional
Quito- Ecuador
jose.oscullo@epn.edu.ec

Patricia Otero
Departamento de Energía Eléctrica
Escuela Politécnica Nacional
Quito- Ecuador
patricia.otero@epn.edu.ec

Resumen— Este trabajo, presenta el cálculo del residuo de los modos críticos de oscilación obtenidos mediante el módulo de análisis modal de PowerFactory de DigSILENT. PowerFactory es una herramienta de ingeniería para analizar sistemas eléctricos, utilizado ampliamente en la industria e investigación. Este software cuenta con el lenguaje de programación propio DigSILENT Programming Language (DPL) permite obtener variables de interés de la aplicación de análisis modal las que pueden ser usadas por otros dispositivos del sistema, como es el caso de la sintonización de estabilizadores de sistemas de potencia (PSS). Mediante programación con las variables de interés, se calcula el residuo de los modos críticos. Así, el cálculo del residuo requiere del procesamiento de la matriz de estados A , proporcionada por PowerFactory y de las matrices de las variables de entrada B y salida C respectivamente, mismas que pueden ser construidas por medio del lenguaje de programación DPL para diferentes escenarios operativos del sistema de potencia. La metodología de cálculo se ha aplicado a un sistema eléctrico de la literatura especializada en estabilidad oscilatoria en el cual se aplica la herramienta para observar la dinámica de los modos de oscilación con y sin PSS, siendo estos últimos sintonizados mediante el residuo.

Keywords— Estabilidad de pequeña señal, Sistemas eléctricos de potencia, Residuos, Análisis modal.

I. INTRODUCCIÓN

En la actualidad el control de una red eléctrica presenta complejidad debido a la cantidad de dispositivos y equipos a ser monitoreados durante la operación. Esta situación de los sistemas eléctricos de potencia (SEP) actuales, requiere del análisis del nivel de estabilidad de pequeña señal, misma que se caracteriza por presentar modos de oscilación de frecuencias desde 0.1 a 3 Hz [1].

Mediante el análisis modal del SEP se determina el nivel de amortiguamiento, el cual depende de la parametrización de los dispositivos de control, entre otras causas [2],[3]. Del modo de oscilación es posible obtener el residuo, el cual permite determinar los parámetros de los elementos de control de oscilaciones como son los estabilizadores de sistemas de potencia (PSS).

Las referencias [2], [4] indican que la estabilidad de pequeña señal se determina mediante los modos de oscilación presentes en un escenario operativo del sistema. Mediante el análisis modal de cada condición operativa del sistema, PowerFactory presenta el factor de participación, la frecuencia, el nivel de amortiguamiento y al igual que otro software de ingeniería no calcula los residuos [5].

Para la determinación de los residuos se requiere del procesamiento de la matriz A que contiene el estado del sistema, la matriz C que indica el nivel de observabilidad de

las variables de salida, la matriz B que muestra la controlabilidad de las variables entradas y los vectores izquierdo y derecho de los modos de oscilación para los cuales es posible obtener el módulo y ángulo del residuo del modo de oscilación analizado [6].

En este artículo se presenta la metodología implementada para la obtención de los residuos de un sistema eléctrico mediante la programación DPL. En el análisis modal de PowerFactory las variables obtenidas en combinación con la construcción de las matrices B y C . Por medio de esta información modificar la sintonización del PSS a fin de incrementar el nivel de estabilidad del sistema de potencia. El documento se estructura de la siguiente manera: la sección 2 describe algunos aspectos clave para la implementación del script DPL, la sección 3 presenta la aplicación de los residuos en la sintonización del PSS para mejorar el nivel de amortiguamiento de las oscilaciones en un sistema de prueba, la sección 4 se realiza la discusión de los resultados encontrados y en la sección 5 se presenta las conclusiones.

II. METODOLOGÍA

En base a lo indicado, en la sección anterior para calcular los residuos de un modo de oscilación de interés en PowerFactory y aplicarlo para el desplazamiento del modo seleccionado por medio de los parámetros del PSS. La variable de estado del modo de oscilación seleccionado en este trabajo se considera la velocidad del generador, gracias a la información que PowerFactory proporciona en el archivo de texto VariableToIdx_Amat.txt.

En la Figura 1, se presenta la metodología que permite obtener el residuo, en la cual mediante el análisis modal se obtiene tanto los valores y vectores propios del modo de oscilación seleccionado. Y con la fila o columna correspondiente de las matrices B y C procesadas respectivamente para la variable de estado monitoreada para el análisis.

Para realizar el análisis modal en PowerFactory se requiere del objeto ComMod* y de las condiciones iniciales de la red eléctrica mediante el objeto ComInc*, así como configurar la exportación de las matrices del sistema, valores propios, vectores propios izquierdo y derecho para que se almacenen en una ruta personalizada por el usuario. Como los PSS son dispositivos de control ubicados en el sistema de excitación de los generadores y dado que PowerFactory permite monitorear a selección del usuario en cada barra la velocidad del rotor del generador.

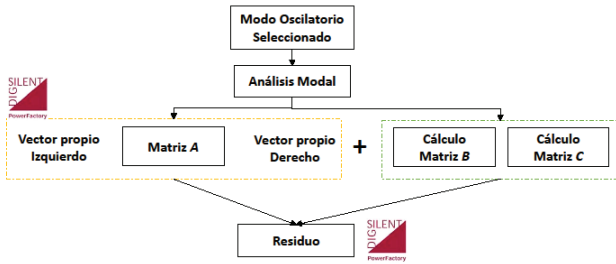


Figura 1. Metodología del Cálculo del Residuo

La programación de la matriz B donde su columna j -ésima se la construye por la variación de la potencia en las barras seleccionadas por el usuario. De acuerdo con (1), se considera la conexión/desconexión mediante un EvtSwitch* en un $\Delta t=0.0001s$ para una carga móvil de 100 MW. Ya que con este Δt es posible obtener un $\Delta x = 0$ y $\Delta u_i = 1$ para la señal de salida con un el error mínimo, siguiendo un enfoque de prueba y error, este paso de tiempo se ha elegido después de comparar la respuesta de la representación no lineal completa y el modelo linealizado [7].

$$B_i = \frac{x\Delta t - x(0)}{\Delta t} \quad (1)$$

Donde $x(0)$ es la condición de carga inicial y x es la nueva condición de carga de la barra analizada.

En el caso de la construcción de la fila i -ésima de la matriz C considera el número de barras seleccionadas por el usuario mediante el comando SetSelect*, donde el valor "1" indica la presencia del PSS del generador conectado en el mismo, caso contrario se colocará "0".

Con esta información, es posible determinar el residuo a través de las ecuaciones (2) a (4) [6]. Donde el k -ésimo vector propio izquierdo y derecho de cada valor propio del modo de oscilación de interés son obtenidos de la lectura de los archivos IEval_Amat.mtl, rEval_Amat.mtl y Evals.mtl respectivamente.

$$B_{ki} = \psi(k, *) B(*, i) \quad (2)$$

$$C_{jk} = C(j, *) \phi(*, k) \quad (3)$$

$$R_{ji} = C_{jk} B_{ki} \quad (4)$$

Donde ψ es el vector propio izquierdo, ϕ es el vector propio derecho y R es el residuo. Ya que, $R_{ji} \in \mathbb{C}$ el ángulo θ del residuo del modo de oscilación da la dirección en la que se desplaza el valor propio λ del i -ésimo modo. Por lo que, para incrementar la estabilidad del sistema se requiere incrementar la parte real del modo de oscilación en la dirección del complemento del ángulo θ , como se muestra en la Fig. 2. Por lo tanto, el desplazamiento del valor propio se puede calcular mediante (5) [8].

$$\Delta\lambda_i = -|R_{ji}|K \quad (5)$$

Donde K representa la ganancia que seleccione el usuario.

La Figura 3, muestra la estructura y los parámetros del PSS modelado utilizando el lenguaje de simulación DIgSILENT (DSL) de PowerFactory. El bloque de ganancia (K_{pss}) permite amplificar la señal de entrada. La constante de tiempo del filtro washout T_w permite filtrar la frecuencia de la señal de entrada a frecuencias en el rango de los modos de oscilaciones de interés, para el estudio esta constante de tiempo se establece en 10 segundos.

Por otro lado, se utilizan filtros denominados bloques de compensación de fase de adelanto y atraso que tienen constantes de tiempo por medio de los cuales se busca desplazar el modo de oscilación seleccionado. Como $R_i = \sigma_i + j\omega_i$ indica la dirección y el módulo del desplazamiento del modo de oscilación crítico considerando un nivel de amortiguamiento ζ seleccionado aplicando las ecuaciones (6) a (9) como lo establece [3], [9].

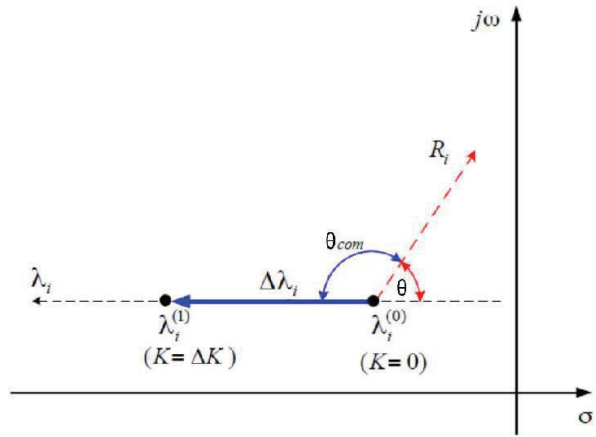


Figura 2. Desplazamiento del modo de oscilación mediante el residuo [3].

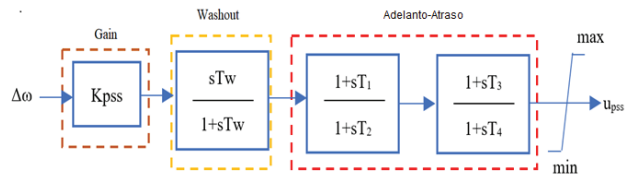


Figura 3. Estructura del tipo de PSS utilizado.

$$\sigma_{selec} = \frac{\zeta_{selec} * \omega_i}{\sqrt{1 - \zeta_{selec}^2}} \quad (6)$$

$$K_{pss} = \frac{|\sigma_i - \sigma_{selec}|}{|R_i * (\pi - \theta)|} \quad (7)$$

$$T_k = \frac{\sqrt{1 + \sin(\frac{\pi - \theta}{2})}}{\omega_i * \sqrt{1 - \sin(\frac{\pi - \theta}{2})}}, \text{ siendo } k \text{ impar} \quad (8)$$

$$T_m = \frac{\sqrt{1 + \sin(\frac{\pi - \theta}{2})}}{\sqrt{1 - \sin(\frac{\pi - \theta}{2})}} * T_k, \text{ siendo } m \text{ par} \quad (9)$$

III. RESULTADOS

La herramienta computacional desarrollada es aplicada en un sistema eléctrico utilizado en la literatura especializada de estabilidad oscilatoria, el cual presenta la mayor clase de modos de oscilación, demandando una alta coordinación en la sintonización de los PSS de entre los generadores que los tengan disponibles, para el caso de estudio se considera que todos los generadores lo tienen disponible como lo establece la referencia [10], presentado en la Figura 4.

En la Figura 5, se observa la distribución de los modos de oscilación, mismo que muestra tres modos de oscilación

interárea con frecuencia promedio de 0.62 Hz y niveles de amortiguamiento bajos e incluso inestable.

La Figura 6, presenta el módulo de los residuos correspondientes al modo de oscilación con un nivel de amortiguamiento de -0.46% requiriéndose la activación del 80% de PSS de los generadores disponibles.

En el escenario sin PSS considerando una falla trifásica en la línea B-C a los 0.5 s y despejada a los 0.6 s. El sistema al no contar con los PSS presenta oscilaciones llevándolo a la inestabilidad. Con los PSS sintonizados por medio del residuo la respuesta en el tiempo de la potencia del generador C_{7G}, las oscilaciones se amortiguan y presentan una operación cuasi estacionaria a partir de los 4 segundos como se muestra en la Figura 7.

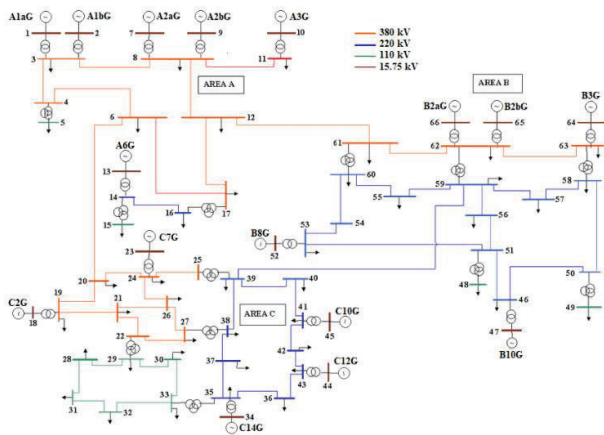


Figura 4. Diagrama Unifilar del sistema New York-New England [10].

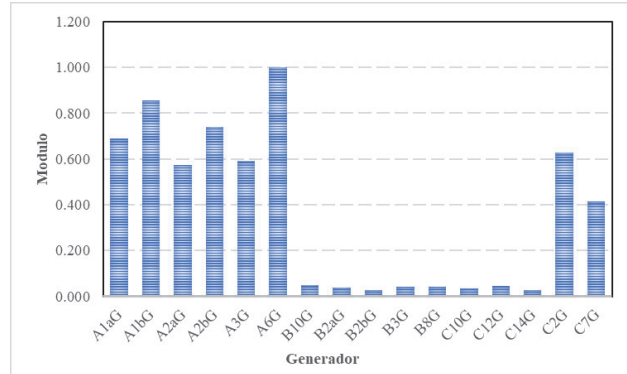


Figura 6. Residuo del sistema New York- New England.

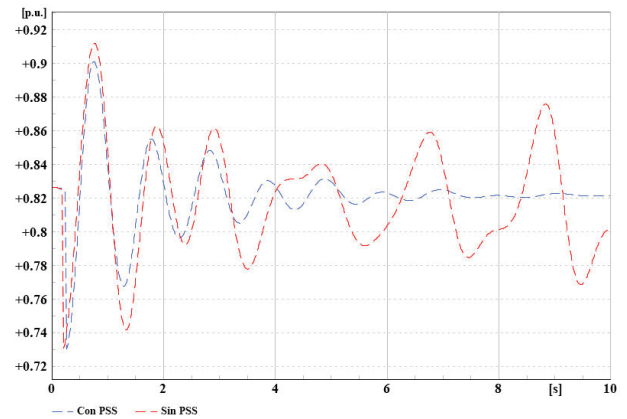


Figura 7. Respuesta de potencia activa del generador C_{7G}.

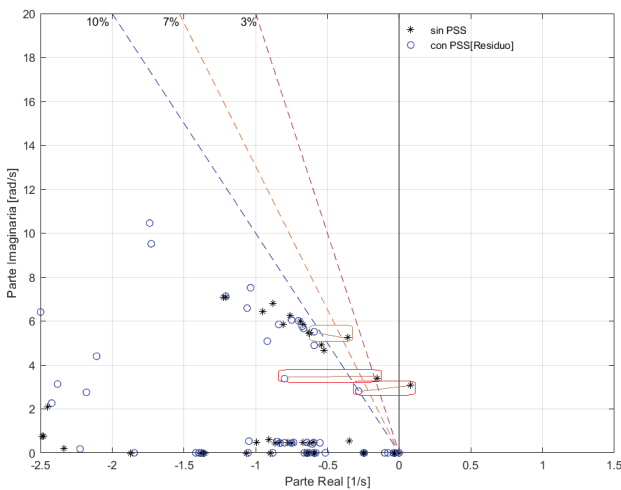


Figura 5. Modos de oscilación del Sistema New York-New England.

IV. DISCUSIÓN

En las Figuras 5 a 7 se observa la efectividad de los residuos para obtener PSS adecuadamente sintonizados y activarlos de manera óptima en los generadores del sistema, esto resulta en un adecuado amortiguamiento de todos los modos críticos, como lo presentado en [10] a través de otras técnicas. Adicional se proporciona al operador del sistema la visualización del desplazamiento dinámico de los modos críticos de la condición operativa mediante la herramienta desarrollada.

V. CONCLUSIONES

En este estudio, se presenta el uso del método de residuos para determinar el nivel de controlabilidad y observabilidad de los modos de oscilación críticos.

Mediante el residuo es posible localizar activar y sintonizar los PSS de los generadores. Situación que permite alcanzar un nivel de amortiguamiento seleccionado por el usuario, en base a la literatura especializada para sistemas pequeños es del 10% y de grande porte un 7%.

Este trabajo muestra que es posible desarrollar una herramienta para parametrizar elementos de control del SEP y con ello mejorar el nivel de estabilidad del sistema eléctrico, mediante el uso de software de ingeniería como PowerFactory.

AGRADECIMIENTOS

Extendemos el agradecimiento al Vicerrectorado de Investigación, Innovación y Vinculación de la Escuela Politécnica Nacional, ya que este trabajo ha sido desarrollado dentro del proyecto PII-DEE-2022-01 “Diseño de herramientas para analizar la dinámica de la estabilidad de pequeña señal de un SEP empleando el análisis modal del programa PowerFactory de DiGSILENT”.

REFERENCIAS

- [1] J. Chow and J. Sanchez Gasca, Power System Modeling, Computation, New York: IEEE Press, 2020.
- [2] D. Mondal, A. Chakrabarti and A. Sengupta, Power System Small Signal Stability and Control, London: Elsevier Academic Press, 2020.

- [3] J. Oscullo and C. Gallardo, "Residue method evaluation for the location of pss with sliding mode control and fuzzy for power electromechanical oscillation damping control" *IEEE Latin America Transactions*, vol. 18, no. 1, pp. 24-31, 2020.
- [4] J. Oscullo and C. Gallardo, "Adaptive tuning of power system stabilizer using a damping control strategy considering stochastic time delay," *IEEE Access*, vol. 8, no. 1, pp. 221-248, 2020.
- [5] DlgSILENT, *PowerFactory User's Manual Version 2021* DlgSILENT GmbH, Gomaringen, Germany: DlgSILENT PowerFactory, 2022.
- [6] P. Kundur, *Power System Stability and Control*, New York: McGraw Hill, 1974.
- [7] H. Silva Saravia, H. Pulgar Painemal and Y. Wang, "Determining wide-area signals and locations of regulating device to damp interarea oscillations through eigenvalue sensitivity analysis using digsilent programming language," in *Advanced Smart Grid Functionalities Based on PowerFactory*, AG Switzerland, Springer, 2018, pp. 153-179.
- [8] M. Edrah, K. Lo and O. Anaya Lara, "Reactive power control of DFIG wind turbines for power oscillation damping under a wide range of operating conditions," *IET Generation, Transmission and Distribution*, vol. 10, no. 15, pp. 3777-3785, 2016.
- [9] C. Rohit, K. Yadav and P. Darji, "Optimal placement of SVC using residue technique and coordination with pss for damping inter-area oscillations," in *Australasian Universities Power Engineering Conference*, Sydney, 2021.
- [10] C. Cañizares, T. Fernandes, E. Geraldi, L. Gerin Lajoie, M. Gibbard, I. Hikens, J. Kersulis, R. Kuiava, L. Lima, F. De Marco, N. Martins, B. Pal, A. Piardi, R. Ramos, J. Do Santos, D. Silva, A. Singh, B. Tamimi and D. Vowless, "Benchmark models for the analysis and control of small-signal oscillatory dynamics in power systems," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 32, no. 1, pp. 715-722, 2017.