

Una técnica de excitación natural extendida para el análisis modal de datos ambiente del sistema eléctrico de potencia

An extended natural excitation technique for the modal analysis of ambient power system data

Jose J. Nuño-Ayón¹, Julián Sotelo-Castañón²,
Eduardo S. Bañuelos-Cabral³, Jorge L. García-Sánchez⁴

Nuño-Ayón, J.J; Sotelo-Castañón, J; Bañuelos-Cabral, E.S;
García-Sánchez, J.L. Una técnica de excitación natural extendida para el análisis modal de datos ambiente del sistema eléctrico de potencia. *Tecnología en Marcha*. Vol. 34, especial. ALTAE. Diciembre 2021. Pág 83-94.

 <https://doi.org/10.18845/tm.v34i7.6018>



- 1 CUCEI, Universidad de Guadalajara. México. Correo electrónico: jose.nuno@academicos.udg.mx
 <https://orcid.org/0000-0003-2846-8097>
- 2 CUCEI, Universidad de Guadalajara. México. Correo electrónico: julian.sotelo@academicos.udg.mx
- 3 CUCEI, Universidad de Guadalajara. México. Correo electrónico: eduardo.banuelos@academicos.udg.mx
- 4 CUCEI, Universidad de Guadalajara. México. Correo electrónico: jorgel.garcias@academicos.udg.mx

Palabras clave

Datos ambiente del sistema eléctrico de potencia; sistemas de medición de área amplia; información dinámica; tensor de tercer orden; descomposición de factores paralelos.

Resumen

Actualmente, varias técnicas avanzadas de procesamiento digital de señales han sido desarrolladas para analizar datos ambiente del sistema eléctrico de potencia obtenidos a partir de sistemas de medición de área amplia. Una técnica de excitación natural extendida se propone en este artículo para caracterizar la información dinámica contenida en los datos ambiente. Esta nueva técnica es basada en la técnica de excitación natural y la descomposición de factores paralelos. La técnica propuesta usa la correlación de los datos medidos a través de varias matrices de correlación que son usadas para formar un tensor de tercer orden. A partir de este tensor de correlaciones, las respuestas al impulso del sistema eléctrico de potencia pueden ser extraídas mediante la descomposición de factores paralelos. Después, el algoritmo de realización de eigensystem se aplica a cada respuesta al impulso del sistema para estimar su frecuencia oscilatoria y su relación de amortiguamiento. La técnica propuesta es aplicada a datos ambiente obtenidos de simulaciones de estabilidad transitoria del sistema eléctrico de potencia Nueva Inglaterra-Nueva York. Los resultados indican que las frecuencias oscilatorias y las relaciones de amortiguamiento pueden ser estimados precisamente usando la técnica propuesta. Por lo tanto, se concluye que la técnica propuesta podría ser usada para el monitoreo de las oscilaciones ambiente usando sistemas de medición de área amplia.

Keywords

Ambient power system data; wide-area measurement systems; dynamic information; third-order tensor; parallel factor decomposition.

Abstract

Nowadays, various advanced signal processing techniques have been developed to analyze ambient power system data obtained from wide-area measurement systems. An extended natural excitation technique is proposed in this paper for characterizing the dynamic information contained in the ambient data. This novel technique is based on the natural excitation technique and parallel factor decomposition. The proposed technique uses the correlation of the measured data through several correlation matrices that are used to form a third-order tensor. From this correlation tensor, the impulse responses of the power system can be extracted by parallel factor decomposition. After, the eigensystem realization algorithm is applied to each impulse response to estimate its oscillatory frequency and damping ratio. The proposed technique is applied to ambient data obtained from transient stability simulations of the New England-New York power system. The results indicate that the oscillatory frequencies and damping ratios can be accurately estimated using the proposed technique. Therefore, it is concluded that the proposed technique could be used for monitoring the ambient oscillations using wide-area measurement systems.

Introducción

Sistemas modernos de medición han facilitado la colección de una gran cantidad de datos en los sistemas eléctricos de potencia (SEPs), los cuales pueden ser usados para monitorear el comportamiento dinámico en condiciones ambiente y transitoria [1]. El comportamiento

dinámico de los SEPs en operación ambiente esta determinada por pequeñas variaciones aleatorias en cargas y otras pequeñas interacciones entre los componentes eléctricos del sistema, originando oscilaciones electromecánicas de baja frecuencia [2]. Por tal razón, estas oscilaciones son inherentes en grandes SEPs interconectados y pueden ser analizados usando herramientas de análisis de datos, tal como se presenta en este trabajo de investigación.

Los SEPs puede presentar varios problemas cuando están operando a su máxima capacidad y las oscilaciones electromecánicas (o modos de oscilación, como son comúnmente conocidos) no son bien amortiguadas. Esta combinación puede resultar en una operación inestable, en una separación no controlada del sistema en islas eléctricas, y consecuentemente, en colapsos del sistema [3]. Por tales razones, el análisis de los modos de oscilación es muy importante porque puede proporcionar información importante sobre la estabilidad del sistema. Un método muy conocido para determinar la estabilidad oscilatoria de un SEP, es el uso de los parámetros modales de los modos de oscilación electromecánicos contenidos en los datos medidos.

En recientes años, los sistemas de medición de área amplia basados en unidades de medición fasorial han sido desarrollados para medir datos ambiente recibidos de varias localizaciones en los SEPs [4]. Estos datos ambiente son conocidos por exhibir fenómenos oscilatorios, altos niveles de ruido y comportamiento no estacionario; por lo tanto, la caracterización y la visualización de los datos ambiente medidos son todo un reto para investigadores y compañías eléctricas. En trabajos previos de investigación [5-8], muchos métodos basados en mediciones han sido propuestos para estimar parámetros modales de las oscilaciones ambiente (tales como: la frecuencia y la relación de amortiguamiento) a partir de una sola medición ambiente. Desafortunadamente, una buena observabilidad de los modos oscilatorios no puede ser siempre lograda usando enfoques de una simple medición. Además, estos enfoques fallan en identificar los modos oscilatorios que son observables solamente en ciertas mediciones clave de la red eléctrica. Por lo tanto, varias técnicas avanzadas de procesamiento de señales han sido propuestas para mejorar la observabilidad de los modos oscilatorios [9-18]. Estos métodos son comúnmente aplicados a múltiples mediciones simultáneamente para la identificación de parámetros modales. En este artículo, una técnica de excitación natural extendida se propone para caracterizar la información dinámica contenida en los datos ambiente, la cual es basada en la técnica de excitación natural y la descomposición de factores paralelos. La técnica propuesta aprovecha la correlación de los datos ambiente medidos a través de varias matrices de correlación que son usadas para formar un tensor de tercer orden. A partir de este tensor de correlaciones, las respuestas al impulso del SEP pueden ser extraídas mediante la descomposición de factores paralelos. Después, el algoritmo de realización de *eigensystem* se aplica a cada respuesta al impulso del sistema para estimar su frecuencia oscilatoria y su relación de amortiguamiento.

Finalmente, un conjunto de datos ambiente obtenidos de simulaciones de estabilidad transitoria del sistema eléctrico Nueva Inglaterra-Nueva York son usados para evaluar el desarrollo de la metodología propuesta. Los resultados obtenidos indican que el método propuesto proporciona una estimación precisa de los parámetros modales a partir de múltiples datos ambiente.

Método propuesto

En esta sección, una técnica de excitación natural extendida es propuesta para la estimación de los modos de oscilación electromecánicos de baja frecuencia a partir de múltiple mediciones ambiente del SEP. Esta técnica propuesta es inspirada en la técnica de excitación natural [13] para mejorar su habilidad de estimación modal.

Técnica de excitación natural

La técnica de excitación natural (en inglés: Natural Excitation Technique - NEXT) fue inicialmente propuesta para el análisis de fenómenos oscilatorios en ingeniería civil [19-20]. Recientemente, este método fue propuesto para analizar los modos de oscilación en los SEPs [13]. A continuación, se muestra la formulación matemática de este método para el análisis modal.

Es bien conocido que el movimiento oscilatorio del rotor de un simple generador puede ser definido por la siguiente ecuación diferencial:

$$M \frac{d^2 \delta}{dt^2} = P_M - P_E - D \frac{d\delta}{dt} \quad (1)$$

donde M es el coeficiente de inercia, P_M es la potencia mecánica, P_E es la potencia eléctrica, D es el coeficiente del amortiguamiento y δ es el ángulo del rotor [21]. De acuerdo a [22], el generador puede ser modelado como un modelo clásico, y entonces, linearizando la ecuación (1) en un punto de operación, se consigue:

$$M \frac{d^2 \Delta \delta}{dt^2} + D \frac{d\Delta \delta}{dt} + K \Delta \delta = 0 \quad (2)$$

donde K es el coeficiente de potencia de sincronización y $\Delta \delta$ denota la desviación de ángulo del rotor alrededor de un punto de equilibrio. Asumiendo que todos los generadores del SEP son modelados con el modelo clásico, por lo tanto, M , D y K en la ecuación (2) se transforman en matrices diagonales que contienen los coeficientes de inercia, los coeficientes de amortiguamiento y los coeficientes de potencia de sincronización de cada generador, respectivamente. Además, en los actuales SEPs, cada generador es constantemente expuesto a cambios aleatorios, la cual es la excitación natural del sistema. Las principales causas de la excitación natural son entonces las cargas del sistema, las cuales varían aleatoriamente por naturaleza. Así mismo, los cambios menores en producción de potencia eléctrica, eventos menores de conmutación (switching) o fallas menores, pueden ser consideradas como la excitación natural del sistema. Tomando en cuenta lo anterior, la ecuación (2) puede ser extendida para describir el comportamiento oscilatorio de cada generador en los SEPs, como:

$$M \Delta \ddot{\delta}(t) + D \Delta \dot{\delta}(t) + K \Delta \delta(t) = F(t) \quad (3)$$

donde $\delta(t)$ es el vector de desplazamiento del ángulo y $F(t)$ es el vector de excitación. Multiplicando (3) por un desplazamiento del ángulo de referencia $\Delta \delta_r(s)$, y tomando el valor esperado de cada lado, se obtiene:

$$ME[\Delta \ddot{\delta}(t) \Delta \delta_r(s)] + DE[\Delta \dot{\delta}(t) \Delta \delta_r(s)] + KE[\Delta \delta(t) \Delta \delta_r(s)] = E[F(t) \Delta \delta_r(s)] \quad (4)$$

donde $E[\cdot]$ denota el valor esperado. La ecuación (4) puede ser ahora escrita como:

$$MR_{\Delta \delta \Delta \delta_r}(t, s) + DR_{\Delta \dot{\delta} \Delta \delta_r}(t, s) + KR_{\Delta \delta \Delta \delta_r}(t, s) = R_{F \Delta \delta_r}(t, s) \quad (5)$$

donde $R(\cdot)$ define un vector de funciones de correlación. Asumiendo que $A(s)$ y $B(s)$ son procesos estacionarios, se puede mostrar que $R_{A^{(m)}B}(\tau) = R_{AB}^{(m)}(\tau)$, donde $\tau = t - s$ y $A^{(m)}$ denota la m -ésima derivada del proceso aleatorio $A(t)$ con respecto al tiempo y $R_{AB}^{(m)}$ denota la m -ésima derivada de la función de correlación $R_{AB}(\tau)$ con respecto a τ . Asimismo, el desplazamiento del ángulo de referencia $\Delta \delta_r(s)$ no está correlacionado a la excitación natural

del sistema $F(t)$ para $\tau > 0$ y la excitación es asumida para ser un proceso de ruido blanco. Por lo tanto, $\mathbf{R}_{F\Delta\delta_r}(t, s) = \mathbf{0}$ se produce para $\tau > 0$. Además, asumiendo que los desplazamientos del ángulo del rotor $\Delta\delta$, $\Delta\dot{\delta}$, $\Delta\delta$ y $\Delta\delta_r$ son procesos estacionarios, la ecuación (5) puede ser escrita como:

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{R}}_{\Delta\delta\Delta\delta_r}(\tau) + \mathbf{D}\dot{\mathbf{R}}_{\Delta\delta\Delta\delta_r}(\tau) + \mathbf{K}\mathbf{R}_{\Delta\delta\Delta\delta_r}(\tau) = \mathbf{0} \quad (6)$$

donde $\tau > 0$ y $\mathbf{R}_{\Delta\delta\Delta\delta_r}(\tau) = [R_{\Delta\delta_1\Delta\delta_r}(\tau) \ R_{\Delta\delta_2\Delta\delta_r}(\tau) \ \dots \ R_{\Delta\delta_m\Delta\delta_r}(\tau)]^T$ es el vector de las funciones de correlación de desplazamiento del ángulo del rotor. Sin embargo, este método NEXT necesita la selección de una variable de referencia $\Delta\delta_r$ para la cálculo de las funciones de correlación cruzada, en donde la variable de referencia es obtenida a partir de la señal ambiente que tenga la amplitud más alta en el espectro de Fourier y que este asociado al modo de oscilación de interés [13]. Para hacer frente a estas desventajas, una técnica de excitación natural extendida se propone a continuación.

Técnica de excitación natural extendida

Siguiendo las ecuaciones (1) a (5), la ecuación (6) es ahora calculada para m señales de referencia con el fin de evitar la selección de una variable de referencia y explotar la correlación existente entre las variables medidas. Formalmente, esto se puede definir como:

$$\begin{aligned} \mathbf{M}\ddot{\mathbf{R}}_{\Delta\delta\Delta\delta_1}(\tau) + \mathbf{D}\dot{\mathbf{R}}_{\Delta\delta\Delta\delta_1}(\tau) + \mathbf{K}\mathbf{R}_{\Delta\delta\Delta\delta_1}(\tau) &= \mathbf{0} \\ \mathbf{M}\ddot{\mathbf{R}}_{\Delta\delta\Delta\delta_2}(\tau) + \mathbf{D}\dot{\mathbf{R}}_{\Delta\delta\Delta\delta_2}(\tau) + \mathbf{K}\mathbf{R}_{\Delta\delta\Delta\delta_2}(\tau) &= \mathbf{0} \\ &\vdots \\ \mathbf{M}\ddot{\mathbf{R}}_{\Delta\delta\Delta\delta_m}(\tau) + \mathbf{D}\dot{\mathbf{R}}_{\Delta\delta\Delta\delta_m}(\tau) + \mathbf{K}\mathbf{R}_{\Delta\delta\Delta\delta_m}(\tau) &= \mathbf{0} \end{aligned} \quad (7)$$

donde M , D y K son matrices diagonales que almacenan los coeficientes de inercia, los coeficientes de amortiguamiento y los coeficientes de potencia de sincronización de cada generador, respectivamente. También se puede observar que los vectores de las funciones de correlación de desplazamiento del ángulo del rotor $\mathbf{R}_{\Delta\delta\Delta\delta_1}(\tau)$, $\mathbf{R}_{\Delta\delta\Delta\delta_2}(\tau)$, ..., $\mathbf{R}_{\Delta\delta\Delta\delta_m}(\tau)$ pueden ser agrupadas en forma matricial. En otras palabras, la ecuación (7) puede ser reescrita de la siguiente manera:

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{R}}_{\Delta\delta\Delta\delta}(\tau) + \mathbf{D}\dot{\mathbf{R}}_{\Delta\delta\Delta\delta}(\tau) + \mathbf{K}\mathbf{R}_{\Delta\delta\Delta\delta}(\tau) = \mathbf{0} \quad (8)$$

donde $\mathbf{R}_{\Delta\delta\Delta\delta}(\tau)$ es una matriz con las funciones de correlación de desplazamiento del ángulo del rotor que satisface las ecuaciones diferenciales homogéneas que describen el comportamiento oscilatorio de cada generador. En un punto de equilibrio, los ángulos de los rotores en los generadores tienen un acoplamiento lineal a las variables físicas, tales como potencia activa, voltajes y otras variables. Como consecuencia, las funciones de correlación producen una estimación de las respuestas impulso del SEP, las cuales pueden ser estimadas a partir de las funciones de correlación de las variables físicas medidas. Para llevar a cabo esto, un conjunto de matrices de correlación son calculadas con el fin de construir un tensor de funciones de correlación, el cual es definido como:

$$\underline{\mathbf{R}} = \begin{array}{|c|} \hline \begin{array}{|c|} \hline \begin{array}{cccc} R_{\Delta\delta_1\Delta\delta_1}(\tau) & R_{\Delta\delta_1\Delta\delta_2}(\tau) & \cdots & R_{\Delta\delta_1\Delta\delta_m}(\tau) \\ R_{\Delta\delta_2\Delta\delta_1}(\tau) & R_{\Delta\delta_2\Delta\delta_2}(\tau) & \cdots & R_{\Delta\delta_2\Delta\delta_m}(\tau) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ R_{\Delta\delta_m\Delta\delta_1}(\tau) & R_{\Delta\delta_m\Delta\delta_2}(\tau) & \cdots & R_{\Delta\delta_m\Delta\delta_m}(\tau) \end{array} \\ \hline \vdots \\ \hline \begin{array}{|c|} \hline \begin{array}{cccc} R_{\Delta\delta_1\Delta\delta_1}(2) & R_{\Delta\delta_1\Delta\delta_2}(2) & \cdots & R_{\Delta\delta_1\Delta\delta_m}(2) \\ R_{\Delta\delta_2\Delta\delta_1}(2) & R_{\Delta\delta_2\Delta\delta_2}(2) & \cdots & R_{\Delta\delta_2\Delta\delta_m}(2) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ R_{\Delta\delta_m\Delta\delta_1}(2) & R_{\Delta\delta_m\Delta\delta_2}(2) & \cdots & R_{\Delta\delta_m\Delta\delta_m}(2) \end{array} \\ \hline \vdots \\ \hline \begin{array}{|c|} \hline \begin{array}{cccc} R_{\Delta\delta_1\Delta\delta_1}(1) & R_{\Delta\delta_1\Delta\delta_2}(1) & \cdots & R_{\Delta\delta_1\Delta\delta_m}(1) \\ R_{\Delta\delta_2\Delta\delta_1}(1) & R_{\Delta\delta_2\Delta\delta_2}(1) & \cdots & R_{\Delta\delta_2\Delta\delta_m}(1) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ R_{\Delta\delta_m\Delta\delta_1}(1) & R_{\Delta\delta_m\Delta\delta_2}(1) & \cdots & R_{\Delta\delta_m\Delta\delta_m}(1) \end{array} \\ \hline \end{array} \end{array} \quad (9)$$

donde $\underline{\mathbf{R}} \in \mathbb{R}^{m \times m \times \tau}$ es un tensor de tercer orden. A partir de este tensor, las respuestas al impulso del SEP pueden ser extraídos mediante la descomposición de factores paralelos [23] que se describe enseguida.

Descomposición de factores paralelos

Usando la descomposición de factores paralelos (en inglés: Parallel Factor Decomposition – PARAFAC Decomposition) o descomposición de PARAFAC [23], el tensor de tercer orden $\underline{\mathbf{R}} \in \mathbb{R}^{m \times m \times \tau}$ puede ser descompuesto en una suma de productos externos de triples vectores (componentes PARAFAC) como se muestra enseguida:

$$\underline{\mathbf{R}} = \sum_{i=1}^n \mathbf{a}_i \circ \mathbf{b}_i \circ \mathbf{c}_i + \underline{\mathbf{E}} \quad (10)$$

donde $i = 1, 2, \dots, n$ es el rango del tensor, el cual permite la reconstrucción del tensor $\underline{\mathbf{R}}$ y $\underline{\mathbf{E}}$ es un tensor residual. La ecuación (10) denota la suma de n componentes PARAFAC que se necesitan para ajustar el tensor de tercer orden. Estas componentes son estimadas por la minimización de la siguiente función de costo: $f(\hat{\mathbf{a}}_i, \hat{\mathbf{b}}_i, \hat{\mathbf{c}}_i) = \|\underline{\mathbf{R}} - \hat{\underline{\mathbf{R}}}\|^2$, la cual expresa un diferencia de mínimos cuadrados entre el tensor original $\underline{\mathbf{R}}$ y el tensor calculado $\hat{\underline{\mathbf{R}}}$. Para calcular la solución de esta función de costo, el algoritmo de mínimos cuadrados alterno es usado debido a su fácil implementación, convergencia garantizada y mejor capacidad de manejo de tensores de alto orden [24]. De acuerdo a la descomposición de PARAFAC [23-24], el tensor de tercer orden $\underline{\mathbf{R}} \in \mathbb{R}^{m \times m \times \tau}$ es entonces estimado con n componentes PARAFAC, los cuales se describen por tres matrices de peso $\hat{\mathbf{A}}$, $\hat{\mathbf{B}}$ y $\hat{\mathbf{C}}$, formadas por los n vectores $\hat{\mathbf{a}}_n$, $\hat{\mathbf{b}}_n$, y $\hat{\mathbf{c}}_n$, que son representados como:

$$\begin{aligned}
 \hat{\mathbf{A}} &= [\hat{\mathbf{a}}_1 \quad \hat{\mathbf{a}}_2 \quad \cdots \quad \hat{\mathbf{a}}_n] \in \mathbb{R}^{m \times n}, & \hat{\mathbf{a}}_n &= [\hat{a}_{1n} \quad \hat{a}_{2n} \quad \cdots \quad \hat{a}_{mn}]^T \in \mathbb{R}^m \\
 \hat{\mathbf{B}} &= [\hat{\mathbf{b}}_1 \quad \hat{\mathbf{b}}_2 \quad \cdots \quad \hat{\mathbf{b}}_n] \in \mathbb{R}^{m \times n}, & \hat{\mathbf{b}}_n &= [\hat{b}_{1n} \quad \hat{b}_{2n} \quad \cdots \quad \hat{b}_{mn}]^T \in \mathbb{R}^m \\
 \hat{\mathbf{C}} &= [\hat{\mathbf{c}}_1 \quad \hat{\mathbf{c}}_2 \quad \cdots \quad \hat{\mathbf{c}}_n] \in \mathbb{R}^{\tau \times n}, & \hat{\mathbf{c}}_n &= [\hat{c}_{1n} \quad \hat{c}_{2n} \quad \cdots \quad \hat{c}_{\tau n}]^T \in \mathbb{R}^\tau
 \end{aligned} \quad (11)$$

donde $\hat{\mathbf{A}} \in \mathbb{R}^{m \times n}$ y $\hat{\mathbf{B}} \in \mathbb{R}^{m \times n}$ son matrices que contienen n vectores de información estadística sobre las variables medidas, la cual esta siendo investigada. Mientras que $\hat{\mathbf{C}} = [\hat{\mathbf{c}}_1 \quad \hat{\mathbf{c}}_2 \quad \cdots \quad \hat{\mathbf{c}}_n] = [\mathbf{R}_1 \quad \mathbf{R}_2 \quad \cdots \quad \mathbf{R}_n] \in \mathbb{R}^{\tau \times n}$, es una matriz con n vectores que contienen

las funciones de correlación de los n modos oscilatorios individuales. Por lo tanto, la frecuencia natural y el factor de amortiguamiento del modo oscilatorio individual puede ser estimada mediante el algoritmo de realización de *eigensystem* [19-20].

Algoritmo de realización de *eigensystem*

Después de la descomposición de factores paralelos, el algoritmo de realización de *eigensystem* (en inglés: Eigensystem Realization Algorithm – ERA) es usado para estimar parámetros modales y el cual ha sido empleado para la identificación modal en otras ingenierías [19-20]. El objetivo principal del algoritmo ERA es encontrar la mínima realización para conseguir una representación de espacio-estado del sistema analizado. Este algoritmo es basado en la representación de espacio-estado siguiente:

$$\begin{aligned} x(k+1) &= \tilde{A}x(k) + \tilde{B}u(k) \\ y(k+1) &= \tilde{C}x(k) \end{aligned} \quad (12)$$

donde \tilde{A} , \tilde{B} , y \tilde{C} son las matrices de espacio-estado en tiempo-discreto, y $x(k)$, $u(k)$ y $y(k)$ son los vectores de estados, de entradas y de salidas, respectivamente. Para desarrollar el algoritmo ERA, cuatro etapas se describen a continuación. En la primera etapa, una matriz de Hankel es formada como:

$$H(k-1) = \begin{bmatrix} y(k) & y(k+1) & \cdots & y(k+p) \\ y(k+1) & y(k+2) & \cdots & y(k+1+p) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ y(k+r) & y(k+r+1) & \cdots & y(k+r+p) \end{bmatrix} \quad (13)$$

donde $y(k)$ es la respuesta al impulso del sistema estimada en tiempo k y los parámetros p y r denotan el número de columnas y filas en la matriz de Hankel. De acuerdo a la recomendación de [19], p es 10 veces el número de modos de oscilación estimados y r es 2 veces p . En este trabajo, la respuesta al impulso (o función de correlación) estimada contiene solamente un modo oscilatorio, por lo tanto, $p=20$ y $r=40$. La segunda etapa es llevar a cabo la descomposición del valor singular (en inglés: Singular Value Decomposition - SVD) de $H(0)$, el cual es definido como sigue:

$$H(0) = P\Sigma Q^T \quad (14)$$

donde P y Q son matrices ortogonales que contienen los vectores singulares izquierdos y derechos, respectivamente, y Σ es una matriz diagonal que tiene los valores singulares. Después de que la SVD se calculó, las matrices condensadas P_c , Σ_c y Q_c (de tamaño 2×2 en nuestro caso) son formadas usando solamente las filas y las columnas relacionadas a los valores singulares más grandes (el resto de las filas y columnas son asociadas con los modos de ruido o modos computacionales). En la tercera etapa, las matrices espacio-estado del sistema analizado son estimadas por las matrices condensadas mencionadas. Para conseguir este análisis, las matrices de espacio-estado en tiempo-discreto pueden ser encontradas mediante:

$$\begin{aligned} \hat{A} &= \Sigma_c^{-1/2} P_c^T H(1) Q_c \Sigma_c^{-1/2} \\ \hat{B} &= \Sigma_c^{-1/2} Q_c^T E_{\bar{m}} \\ \hat{C} &= E_c^T P_c \Sigma_c^{-1/2} \end{aligned} \quad (15)$$

donde $E_c^T = [I \ 0]$ y $E_m^T = [I \ 0]$. La última etapa es convertir las matrices de espacio-estado en tiempo continuo mediante la transformación de Tustin [19-20]. A partir de esta transformación, los parámetros modales del SEP analizado pueden ser obtenidos a partir de los valores propios de \hat{A} (de dimensiones 2×2 en este trabajo). Por lo tanto, esta matriz tiene solamente un valor propio conjugado, el cual es denotado por:

$$\lambda = \sigma \pm j\omega \quad (16)$$

donde λ es el valor propio asociado con un modo de oscilación electromecánico. Una vez que λ es conocido, la frecuencia oscilatoria y la relación de amortiguamiento pueden ser calculadas como:

$$f = \frac{\omega}{2\pi}; \zeta = \frac{-\sigma}{\sqrt{\sigma^2 + \omega^2}} 100 \quad (17)$$

donde f y ζ son proporcionados en hercios (Hz) y en porcentaje (%), respectivamente.

Resultados y discusión

En esta sección, el desarrollo de la técnica de excitación natural extendida es probada sobre datos ambiente de un SEP de prueba para el análisis de los modos de oscilación electromecánicos de baja frecuencia.

Red eléctrica de prueba

El SEP de Nueva Inglaterra-Nueva York es usado para demostrar la habilidad de la técnica propuesta para estimar parámetros modales. Este sistema está compuesto de 16 generadores, 68 buses y 5 áreas eléctricas; un diagrama unifilar se muestra en la figura 1. Todos los generadores son modelados en detalle y la información sobre los datos del sistema puede ser encontrada en [3].

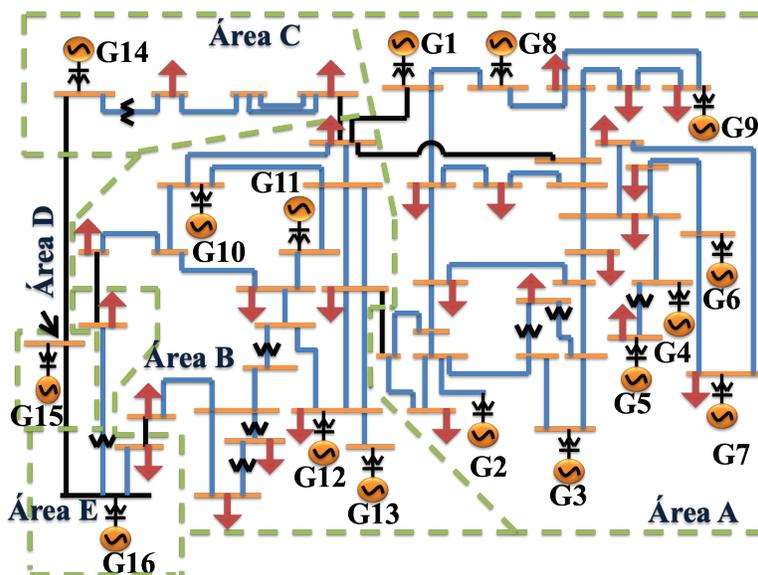


Figura 1. Diagrama unifilar del SEP de Nueva Inglaterra-Nueva York.

Datos ambiente simulados

Con el fin de excitar los modos de oscilación electromecánicas bajo condiciones ambiente, el anterior sistema de prueba es simulado y perturbado por variaciones aleatorias pequeñas en todo el sistema de cargas. Estas variaciones de carga son consideradas para ser una distribución normal o Gaussiana con promedio igual a cero y una varianza igual a uno. Dicha simulación numérica es basada en un programa de estabilidad transitoria [3], la cual es llevada a cabo para 300 segundos y 10 muestras por segundo fueron obtenidas. En este caso de estudio, se asume que todas las señales de desviación de velocidad angular de los generadores son registradas por un sistema de medición de área amplia.

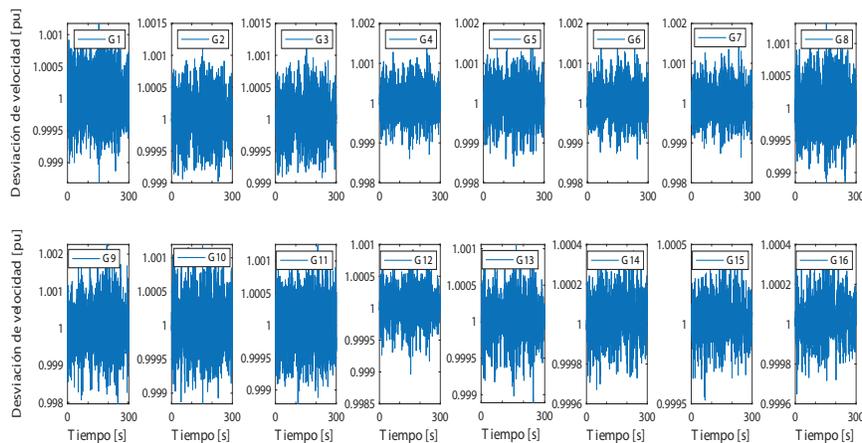


Figura 2. Mediciones ambiente de desviación de velocidad angular.

En la figura 2 se muestran las señales ambiente de desviación de velocidad angular de los 16 generadores y en la figura 3 se presenta la señal ambiente del generador # 1, así como su espectro de Fourier. Como puede observar, la señal ambiente medida exhibe un comportamiento estacionario, con mucho ruido y con fenómenos oscilatorios. Algunas de estas características se pueden observar en el espectro de Fourier, como por ejemplo, hay tres frecuencias dominantes, las cuales están en 0.4175 Hz, 0.6525 Hz y 0.9510 Hz, respectivamente.

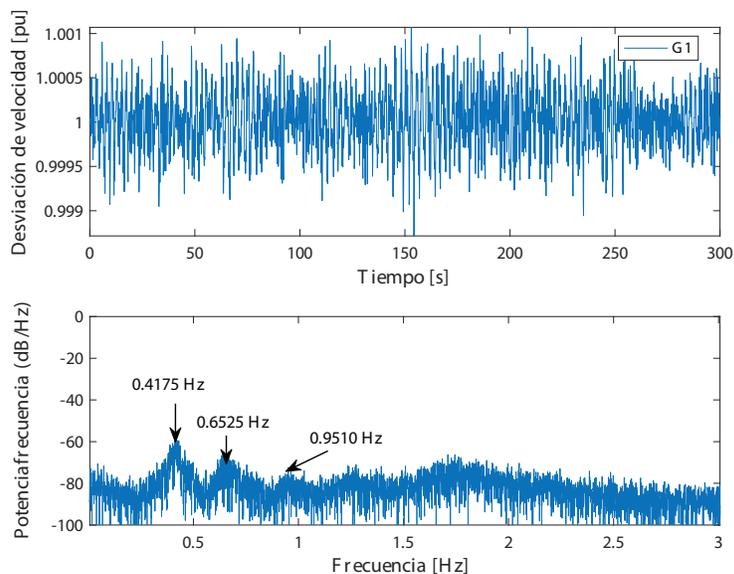


Figura 3. Medición ambiente del generador # 1 y su espectro de Fourier.

Por referencia y comparación, los modos de oscilación electromecánicos fueron también calculados usando un programa de análisis de estabilidad de pequeña señal [3]. En el Cuadro 1 se presenta solamente los tres modos de oscilación más lentos, los cuales son 0.4203 Hz, 0.6465 Hz y 0.9631 Hz. De estos tres modos, los dos primeros son modos de tipo inter-área y el último es un modo de tipo local.

Cuadro 1. Parámetros modales teóricos basados en el análisis de pequeña señal.

Modo	Valor propio	Frecuencia (Hz)	Relación de amortiguamiento (%)	Tipo de modo
1	$-0.0817 \pm j2.6410$	0.4203	3.0920	Inter-área
2	$-0.1905 \pm j4.0621$	0.6465	4.6860	Inter-área
3	$-0.2364 \pm j6.0513$	0.9631	3.9040	Local

Identificación de parámetros modales

Mediante el uso de la metodología descrita en las secciones anteriores, las 16 mediciones ambiente de velocidad angular de los generadores son usadas y definidas como ω_i , donde $i = 1, \dots, 16$. Para cada una de las señales ambiente, su promedio es extraído, y entonces 100 retrasos en tiempo son seleccionados para llevar la auto-correlación y la correlación cruzada entre las 16 mediciones. Logrando así que 100 matrices de correlación sean obtenidas R_{ij} , las cuales son usadas para formar un tensor de tercer orden denotado por \mathcal{R} . A partir de este tensor de correlaciones \mathcal{R} , una descomposición de factores paralelos de rango tres es empleada para extraer las respuestas al impulso del sistema.

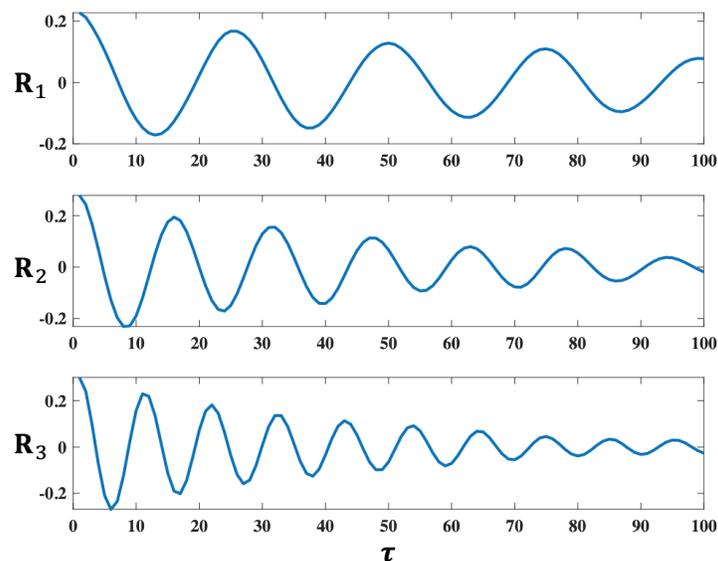


Figura 4. Respuestas al impulso del sistema de prueba.

En la figura 4 se muestran las respuestas al impulso extraídas por la descomposición de factores paralelos y como se puede observar, cada respuesta al impulso tiene un comportamiento oscilatorio dominante. Posteriormente, la frecuencia oscilatoria y la relación de amortiguamiento son estimadas para cada respuesta al impulso del sistema mediante el algoritmo ERA. Los resultados obtenidos de la estimación de los parámetros modales están dados en el cuadro 2, los cuales son consistentes con los parámetros modales teóricos de pequeña señal presentados en el cuadro 1.

Cuadro 2. Estimación de parámetros modales de las respuestas al impulso.

Respuesta al impulso	Parámetros modales	
	Frecuencia (Hz)	Relación de amortiguamiento (%)
R_1	0.4079	3.5956
R_2	0.6434	4.5269
R_3	0.9476	3.9225

Conclusiones

En años recientes, la aplicación de técnicas avanzadas de procesamiento de señales para el análisis de la información dinámica de mediciones de área amplia se ha vuelto cada vez más relevante. En este artículo, la técnica de excitación natural es extendida y mejorada con el fin de estimar modos de oscilación electromecánicos de baja frecuencia a partir de datos ambiente simulados. Esta técnica explota la correlación de los datos mediante correlaciones propias y cruzadas con el fin de construir un tensor de tercer orden y estimar las respuestas al impulso del SEP mediante la descomposición de factores paralelos. Una vez obtenidas dichas respuestas, la frecuencia oscilatoria y la relación del amortiguamiento son identificados por el algoritmo de realización de eigensystem. Los resultados del análisis de los datos ambiente simulados indican que la metodología propuesta, es bien apropiada para señales que tienen correlación y altos niveles de ruido. Además, el uso de una ventana deslizante permitiría que la técnica propuesta tenga un gran potencial para el monitoreo de los datos ambiente en los SEPs. Sin embargo, las causas que originan los datos ambiente (variaciones aleatorias pequeñas en cargas eléctricas del sistema y otras fluctuaciones aleatorias pequeñas) en los SEPs no pueden ser identificadas. En trabajos futuros, esperamos reportar la estimación de la excitación modal del SEP durante la operación ambiente.

Referencias

- [1] J. F. Hauer, D. J. Pal, D. J. Trudnowski, and J. G. DeSteele, "A perspective on wams analysis tools for tracking of oscillatory dynamics," *IEEE Power Engineering Society General Meeting*, pp. 1-10, Tampa, USA, June 2007.
- [2] J. W. Pierre, D. J. Trudnowski, and M. K. Donnelly, "Initial results in electromechanical mode identification from ambient data," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 12, no. 3, pp. 1245-1251, August 1997.
- [3] G. Rogers, *Power System Oscillations*, Kluwer Academic Publishers, USA, 2000.
- [4] A. G. Phadke and J. S. Thorp, *Synchronized Phasor Measurements and their Applications*, Springer, USA, 2008.
- [5] R. W. Wies, J. W. Pierre, and D. J. Trudnowski, "Use of arma block processing for estimating stationary low-frequency electromechanical modes of power systems," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 18, no. 1, pp. 167-173, February 2003.
- [6] G. Liu and V. Venkatasubramanian, "Oscillation monitoring from ambient PMU measurements by frequency domain decomposition," *IEEE International Symposium on Circuits and Systems*, pp. 2821-2824, Seattle, USA, May 2008.
- [7] J. Turunen, L. Haarla, and T. Rauhala, "Performance of wavelet-based damping estimation method under ambient conditions," *IREP Symposium Bulk Power System Dynamics and Control - VIII*, Rio de Janeiro, Brazil, August 2010.
- [8] L. Vanfretti, L. Dosiek, J. W. Pierre, D. Trudnowski, J. H. Chow, R. Garca-Valle, and U. Aliyu, "Application of ambient analysis techniques for the estimation of electromechanical oscillations from measured PMU data in four different power systems," *European Transactions on Electrical Power*, vol. 21, no. 4, pp. 1640-1656, May 2011.
- [9] M. Larsson and D. S. Laila, "Monitoring of inter-area oscillations under ambient conditions using subspace identification," *IEEE Power & Energy Society General Meeting*, pp. 1-6, Calgary, Canada, July 2009.



- [10] J. Thambirajah, N. F. Thornhill, and B. C. Pal, "A multivariate approach towards inter-area oscillation damping under ambient conditions via independent component analysis and random decrement," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 26, no. 1, pp. 315-322, February 2011.
- [11] J. M. Seppänen, L. C. Haarla, and J. Turunen, "Modal analysis of power systems with eigendecomposition of multivariate autoregressive models," *IEEE PowerTech*, pp. 1-6, Grenoble, France, June 2013.
- [12] S. A. N. Sarmadi and V. Venkatasubramanian, "Electromechanical mode estimation using recursive adaptive stochastic subspace identification," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 29, no. 1, pp. 349-358, January 2014.
- [13] J. M. Seppänen, J. Turunen, M. Koivisto, N. Kishor, and L. C. Haarla, "Modal analysis of power systems through natural excitation technique," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 29, no. 4, pp. 1642-1652, July 2014.
- [14] P. Zhang, X. Wang, X. Wang, and J. S. Thorp, "Synchronized measurement based estimation of inter-area electromechanical modes using the Ibrahim time domain method," *Electric Power Systems Research*, vol. 111, pp. 85-95, March 2014.
- [15] J. M. Seppänen, J. Turunen, M. Koivisto, and L. C. Haarla, "Measurement based analysis of electromechanical modes with second order blind identification," *Electric Power Systems Research*, vol. 121, pp. 67-76, April 2015.
- [16] P. Zhang, Y. Teng, X. Wang, and X. Wang, "Estimation of interarea electromechanical modes during ambient operation of the power systems using the RDT-ITD method," *Electric Power Systems Research*, vol. 71, pp. 285-296, April 2015.
- [17] H. Khalilinia, and V. Venkatasubramanian, "Modal analysis of ambient PMU measurements using orthogonal wavelet bases," *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 6, no. 6, pp. 2954-2962, November 2015.
- [18] S. You, J. Guo, G. Kou, Y. Liu, and Y. Liu, "Oscillation mode identification based on wide-area ambient measurements using multivariate empirical mode decomposition," *Electric Power Systems Research*, vol. 134, pp. 158-166, January 2016.
- [19] J. M. Caicedo, S. J. Dyke, and E. A. Johnson, "Natural excitation technique and eigensystem realization algorithm for phase I of the IASC-ASCE benchmark problem: simulated data," *Journal of Engineering Mechanics*, vol. 130, no. 1, pp. 49-60, January 2004.
- [20] J. N. Juang and R. S. Pappa, "An eigensystem realization algorithm for modal parameter identification and model reduction," *Journal of Guidance*, vol. 8, no. 5, pp. 620-627, October 1985.
- [21] P. Kundur, *Power System Stability and Control*, McGraw-Hill Education, USA, 1994.
- [22] J. Machowski, J. Bialek, and J. Bumby, *Power System Dynamics: Stability and Control*, Wiley, U. K., 1997.
- [23] R. Bro, "PARAFAC: Tutorial and applications," *Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems*, vol. 48, no. 2, pp. 149-171, October 1997.
- [24] G. Tomasi and R. Bro, "A comparison of algorithms for fitting the PARAFAC model," *Computational Statistics and Data Analysis*, vol. 50, no. 7, pp. 1700-1734, April 2006.