

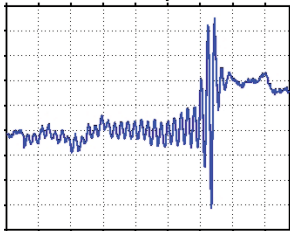
Generación de alarma ante oscilaciones mediante la transformada digital Taylor-Fourier

Demetrio García Almazán^A, José Antonio De la O Serna^B,
Enrique Martínez Martínez^A

^A Centro Nacional de Control de Energía de la CFE.

^B Doctorado en Ingeniería Eléctrica, FIME-UANL

jdela@ieee.org



RESUMEN

En el presente trabajo se desarrolla una aplicación de la Transformada Digital de Taylor-Fourier (DTFT) en la evaluación de estabilidad de Sistemas Eléctricos de Potencia (SEP). Se muestran las ecuaciones de análisis y síntesis de la DTFT, y se describen brevemente los diferenciadores máximamente lisos mediante descomposición de Taylor por mínimos cuadrados (LS) y el modelo de la señal utilizado bajo oscilaciones de potencia. Se lleva a cabo un análisis de Prony sobre una señal de diferencia angular obtenida en campo para evaluar la estabilidad del SEP que produce dicha señal. La DTFT se implementa en un algoritmo utilizado en relevadores digitales para la detección de oscilaciones de potencia y se evalúa si el comportamiento de la oscilación es estable o inestable. Se compara con el método de Prony tanto para evaluar el comportamiento de la oscilación, como para comprobar la factibilidad de su implementación en un relevador digital.

PALABRAS CLAVE

Estabilidad de SEP, oscilación de potencia, transformada digital de Taylor-Fourier.

ABSTRACT

The digital Taylor-Fourier transform (DTFT) is applied in the stability assessment of power systems. The analysis and synthesis equations of the DTFT are developed, and the maximally flat differentiators are illustrated. These ideal differentiators result from the Taylor approximation through least squares of the signal model under power oscillations. A Prony analysis is carried on the angular difference signal obtained in the field in a real power system in order to assess its stability. The DTFT is implemented in an algorithm used in a digital relay to detect power oscillations, and the stable-unstable behavior is assessed using a threshold. The results are compared with the Prony analysis to estimate the oscillation, as well as to demonstrate its feasibility in a digital relay.

KEYWORDS

Power systems stability, power oscillations, digital Taylor-Fourier transform

INTRODUCCIÓN

Desde su invención, el fasor ha sido considerado como un concepto de estado estable. Esta afirmación es tomada en cuenta en muchos de los algoritmos de estimación fasorial de hoy en día. Sin embargo, cuando la señal presenta condiciones oscilatorias, la amplitud y fase de la misma presentan cambios en el tiempo. Este trabajo explora una aplicación de la Transformada Digital de Taylor-Fourier (DTFT) presentada en¹ para la evaluación de estabilidad en Sistemas Eléctricos de Potencia (SEP) el cual, es un tema de especial importancia, debido a que la demanda de energía eléctrica se ha ido incrementando tanto por los descubrimientos tecnológicos como por el incremento de la población.

Aquí se pretende prolongar el uso de la DTFT hasta el análisis de estabilidad, construyendo con las estimaciones fasoriales, estimaciones de la diferencia angular entre dos puntos del sistema y aplicando la DTFT en la frecuencia cero para estimar las primeras dos derivadas del ángulo que son cruciales para determinar la condición de inestabilidad del sistema de potencia.

En los últimos años, los SEP han estado operando al límite de sus capacidades debido a que la demanda de energía eléctrica se ha incrementado considerablemente y la infraestructura del sistema eléctrico ha permanecido resagada. Estos incrementos en la demanda de energía han dado lugar a oscilaciones en los SEP llevándolos a condiciones de estrés, esto a causa de que dichas oscilaciones restringen la cantidad de potencia que puede ser transferida a través de las líneas de interconexión, además de repercutir en la operación económica del SEP. Si no se toman las acciones remediales necesarias, estas oscilaciones pueden provocar la separación del sistema o grandes apagones, por lo que es de gran importancia una temprana indicación para evitar la inestabilidad y prevenir cortes de energía mayores.

La frecuencia del SEP está determinada por la velocidad angular de los generadores síncronos en el sistema. Cada excursión de la velocidad angular, es ocasionada por un desbalance entre potencia eléctrica y potencia mecánica en la flecha del generador. Se han hecho algunos trabajos que utilizan la frecuencia y su derivada como parámetros para calcular el déficit

de potencia e implementar esquemas de desconexión de carga.^{2,3} Otros trabajos se han enfocado en enlazar mediciones fasoriales en tiempo real con el conocimiento preexistente obtenido de los resultados obtenidos mediante simulaciones en ordenador.⁴⁻⁶ Otros investigadores han propuesto estimar la envolvente compleja de la señal en condiciones de oscilación utilizando el análisis de Hilbert,⁷ sin embargo, dicho método requiere de algoritmos adicionales para reducir el error numérico y llevar a cabo su implementación. Otro trabajo utiliza el análisis modal mediante un método de Prony modificado⁸ buscando tomar acciones remediales para mitigar las oscilaciones pero es vulnerable a transiciones no lineales, las cuales aumentan el error. En la referencia⁹ se estiman la frecuencia y el amortiguamiento del espectro de la señal mediante un análisis de Fourier, así como la estimación de los eigenvalores y eigenvectores que se presentan durante los disturbios ocurridos en el sistema; el problema de dicho método es que requiere de un gran número de muestras para poder llevar a cabo la estimación. Existe otro trabajo¹⁰ que utiliza redes neuronales y funciones de base radial recurrente para estimar los ángulos y las velocidades angulares de los generadores, pero dichos estimados son imprecisos en condiciones inestables del sistema.

Debido al incremento de cargas no lineales como los dispositivos de electrónica de potencia, la contaminación armónica ha llegado a ser un problema serio. La estimación armónica en los SEP es muy importante, dado que las armónicas producen muchos efectos dañinos en la red,^{11,12} por lo que deben ser monitoreadas lo más preciso posible. Debido a esto, las condiciones de oscilación tienen un impacto no solo en la componente fundamental de la frecuencia, sino que también en los armónicos presentes en la red.¹³

Las oscilaciones de potencia conllevan una variación en amplitud, fase y frecuencia de las señales, las cuales pueden proporcionar información muy valiosa sobre la condición de operación del SEP. En aplicaciones tradicionales, las Unidades de Medición Fasorial (PMUs) se encargan de recabar dicha información y enviarla a los relevadores y centros de control. Con esta información es posible determinar si el SEP está al borde de la inestabilidad en tiempo real mediante el uso de sincrofasores.^{14,15}

Esto es una gran ventaja, ya que la mayoría de los métodos para evaluar estabilidad son post-mortem o buscan predecir el comportamiento del sistema.^{16,17} La DTFT es una herramienta que puede llevar a cabo dicha tarea y se busca con ello mostrar una de las aplicaciones que puede tener dicho algoritmo en SEP. Es por ello, que con estos antecedentes sea posible generar una alarma para prevenir la separación del sistema eléctrico mediante los estimados obtenidos con la DTFT.

El trabajo se organiza de la siguiente forma: En la siguiente sección se describirá el modelo de señal adoptado bajo oscilaciones de potencia y se da una descripción del algoritmo de la DTFT. También se da una breve mención del método de Prony, el cual se toma como referencia para evaluar la estabilidad del SEP, debido a que es un método que trabaja en una forma más directa con señales, así como la herramienta que se utilizará para llevar a cabo dicho análisis. Posteriormente, se describe el algoritmo de detección de oscilaciones de potencia sobre el cual se implementará la DTFT y se compararán con los resultados obtenidos mediante Prony en la evaluación de estabilidad. Finalmente, se exponen las conclusiones, las ventajas y limitaciones de este algoritmo.

MODELO DE LA SEÑAL PARA OSCILACIONES DE POTENCIA

Las técnicas de estimación fasorial normalmente asumen un modelo de señal sinusoidal con amplitud y fase constantes:

$$s(t) = a_0 \cos(2\pi f_1 t + \varphi_0), \quad -\frac{T}{2} \leq t \leq \frac{T}{2} \quad (1)$$

con suposiciones de estado estable.

Sin embargo, en oscilaciones de potencia las oscilaciones de amplitud y de fase pueden ser modeladas de una mejor forma por una señal pasabanda de la forma

$$s(t) = a(t) \cos(2\pi f_1 t + \varphi(t)) \quad (2)$$

donde $a(t)$ es la amplitud y $\varphi(t)$ es la fase de la señal $s(t)$. Dichos parámetros son formas de onda reales. En una señal pasabanda, el contenido frecuencial está concentrado en una banda estrecha en la vecindad de la frecuencia fundamental, como en una oscilación de potencia.

El modelo (2) puede ser escrito en forma exponencial de la siguiente manera

$$\begin{aligned} s(t) &= \frac{1}{2} \left(p(t) e^{j2\pi f_1 t} + \bar{p}(t) e^{-j2\pi f_1 t} \right) \\ &= \Re \{ p(t) e^{j2\pi f_1 t} \}, \quad -\frac{T}{2} \leq t \leq \frac{T}{2} \end{aligned} \quad (3)$$

donde $p(t) = a(t) e^{j\varphi(t)}$ es la envolvente compleja de la señal pasabanda $s(t)$ y es llamada fasor dinámico de la oscilación. Esta es una función compleja expresada en forma polar, donde $a(t)$ y $\varphi(t)$ son las modulaciones en amplitud y fase de $s(t)$.¹⁸

Aproximación mediante la DTFT

El modelo de fasor puede aproximarse en cada intervalo de tamaño T mediante un polinomio de Taylor de segundo orden

$$p^{(2)}(t) = p_0 + p_1 t + p_2 t^2, \quad -\frac{T}{2} \leq t \leq \frac{T}{2} \quad (4)$$

alrededor del centro del intervalo t_0 . En (4), p_0, p_1 y $p_2 \in \mathbb{C}$ y $t \in \mathbb{R}$. Los coeficientes de la serie son las derivadas del fasor dinámico en el centro del intervalo: $p_0 = p(0)$, $p_1 = p'(0)$ y $p_2 = p''(0)/2$. Esto puede extenderse también a las demás componentes armónicas de la señal.

Esta aproximación de Taylor extiende la transformada digital de Fourier (DFT) a la DTFT ya que se modulan los vectores de la matriz de Fourier con polinomios de Taylor de k -ésimo orden. Para este caso se utiliza un polinomio de orden $k=3$ aumentándola a $C=k+1=4$ ciclos ya que cada término de Taylor agrega una matriz de Fourier modulada a la matriz base, por lo que esta necesita ser aumentada verticalmente para evitar una matriz mal condicionada.¹⁹

Si $L=CN$ es la longitud del intervalo de tiempo de observación de la DTFT en muestras, se define una matriz diagonal T_L de $L \times L$, que contiene la secuencia de enteros $-L/2, \dots, L/2-1$. Por lo que se tiene la siguiente ecuación de síntesis.

$$\hat{x}_{4N} = \frac{1}{N} \mathbf{B}_{4N} \hat{X}_{4N} \quad (5)$$

donde \mathbf{B}_{4N} es la matriz de transformación y \hat{X}_{4N} es el vector que contiene los estimados de las derivadas del espectro de tiempo en el centro del intervalo de observación.

La DTFT está dada por la solución de mínimos cuadrados:

$$\hat{X}_{4N} = (\mathbf{B}_{4N}^H \mathbf{B}_{4N})^{-1} \mathbf{B}_{4N}^H \mathbf{x}_{4N} \quad (6)$$

donde

$$\mathbf{B}^\dagger = (\mathbf{B}_{4N}^H \mathbf{B}_{4N})^{-1} \mathbf{B}_{4N}^H \quad (7)$$

es la matriz pseudoinversa, la cual contiene las respuestas impulsionales del banco de filtros alrededor de cada frecuencia armónica. Tal y como se muestra en la figura 1, estos filtros poseen ganancias ideales de diferenciación en un vecindario alrededor de una armónica h y ganancias lisas nulas alrededor de las demás frecuencias armónicas, lo cual indica la perfecta extracción de las derivadas en la frecuencia central y el completo rechazo de las componentes armónicas cuando la densidad espectral está circunscrita en esos intervalos.¹³

Cuando se busca llevar a cabo la estimación del espectro de la señal por un polinomio de Taylor de k -ésimo orden en $\omega=0$ se obtienen solamente coeficientes reales en la matriz de transformación \mathbf{B} , lo cual modifica la matriz de Gram obteniendo un ajuste simultáneo temporal y espectral del modelo de la señal a las de la señal de entrada respectivamente, adaptando las ganancias de sus derivadores a las respuestas en frecuencia de derivadores ideales junto a la frecuencia nula, produciendo filtros máximamente lisos en la banda base.²⁰

La aproximación por mínimos cuadrados (LS) de un modelo de señal de Taylor, aproxima las primeras k derivadas del espectro de la ventana con los correspondientes polinomios de Taylor de

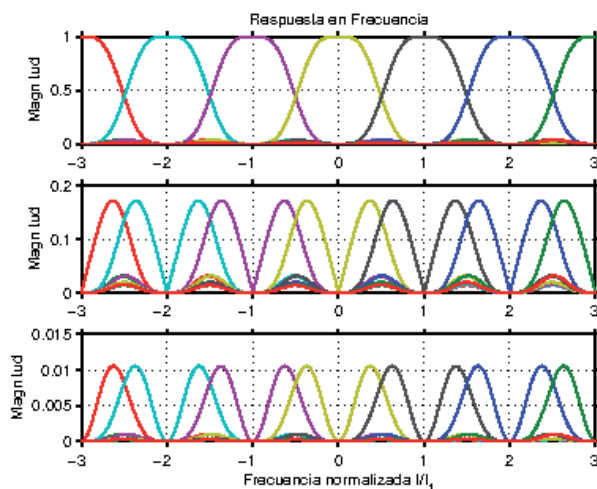


Fig. 1. Respuesta en frecuencia del banco de filtros de la matriz pseudoinversa.

k -ésimo orden en $\omega=0$. Las respuestas del banco de diferenciadores se construyen con combinaciones lineales del espectro de la ventana y sus derivadas. Esta respuesta es muy útil para evaluar su comportamiento en términos del contenido frecuencial de la señal y en particular su comportamiento ante el ruido.

En la figura 2 se muestran las respuestas en frecuencia de los primeros tres diferenciadores obtenidos con el algoritmo LS, y órdenes progresivos de aproximación $k=2, 4, 6$ y 8 . Note que las ganancias ideales de diferenciación son alcanzadas en la banda base, y que el ancho de banda aumenta con el orden de aproximación. Para un mismo diferenciador, los órdenes impares tienen la misma respuesta en frecuencia que el orden precedente par.

Método de Prony

El método de Prony fue desarrollado en 1795 en la École Polytechnique por le Baron de Prony. Este método fue introducido a aplicaciones de SEP en 1990 y se ha usado en estudios de transitorios y oscilaciones electromecánicas en sistemas de potencia.²¹ Además, es un método que trabaja en una forma más directa con señales proporcionando parámetros tales como: amplitud, frecuencia, fase y amortiguamiento; siendo estas las razones por las que se empleará como un método de referencia para nuestro estudio de estabilidad. Se puede encontrar más información sobre este método en las referencias ^{22,23}.

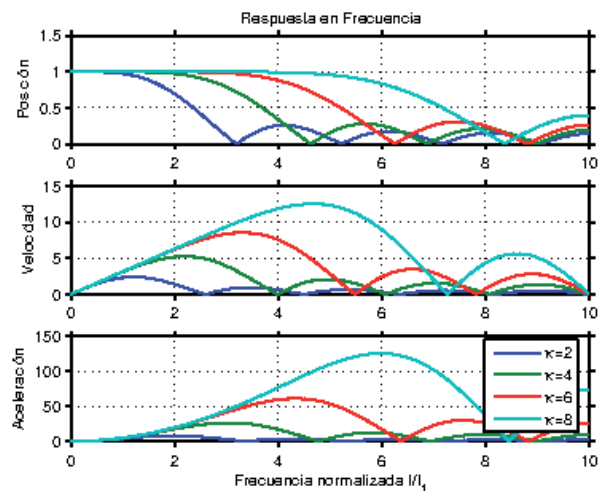


Fig. 2. Respuestas en frecuencia de diferenciadores obtenidos mediante LS con polinomios de Taylor de diferentes órdenes, $k=2, 4, 6$ y 8 .

Para llevar a cabo el estudio mediante Prony, se utilizó la herramienta Ringdown Analysis Tool (RAT) de MATLAB,²⁴ el cual nos entrega, además de los parámetros antes mencionados, los diagramas de polos y ceros y la respuesta en el tiempo del sistema analizado, entre otras cosas más.²⁵

CASO DE ESTUDIO

En esta sección se llevará a cabo un estudio de estabilidad mediante el método de Prony a una señal de diferencia angular entre dos puntos del sistema eléctrico de un país norteamericano. La señal analizada, la cual posee una frecuencia de aproximadamente 0.09Hz y se muestra en la figura 3. Los resultados obtenidos mediante el análisis de Prony, se usarán como referencia para el análisis efectuado mediante el uso de la DTFT en la siguiente sección.

Llevando a cabo un análisis mediante DTFT, se obtienen los armónicos que están presentes en dicha señal, así como sus derivadas. En este caso, se aplica la DTFT a la señal normalizada para que la componente de DC no sea de una magnitud tan grande que impida ver el valor de los demás componentes armónicos, de tal forma que los armónicos presentes en la señal puedan apreciarse. El contenido armónico de la señal se muestra en la figura 4 y con mayor detalle, en la figura 5.

Como puede apreciarse en el detalle mostrado en la figura 5, existe una segunda armónica que tiene un valor grande cuando la oscilación es más fuerte, mientras que durante el resto de la oscilación posee un valor muy pequeño. Esta componente armónica, junto con la componente de DC y la fundamental, son las componentes que se harán presentes en los resultados del análisis de Prony, llevado a cabo mediante el RAT.

Dada la forma irregular de la señal, esta se analiza en tres intervalos distintos: el primer intervalo, donde el incremento de la amplitud de la oscilación es suave; el segundo donde el incremento en la amplitud de la oscilación es más pronunciado y finalmente, el tercer intervalo donde se amortigua la señal. Esto, con el fin de obtener una buena estimación. Los parámetros de frecuencia, amortiguamiento, amplitud y fase de los modos obtenidos para esos tres intervalos mediante

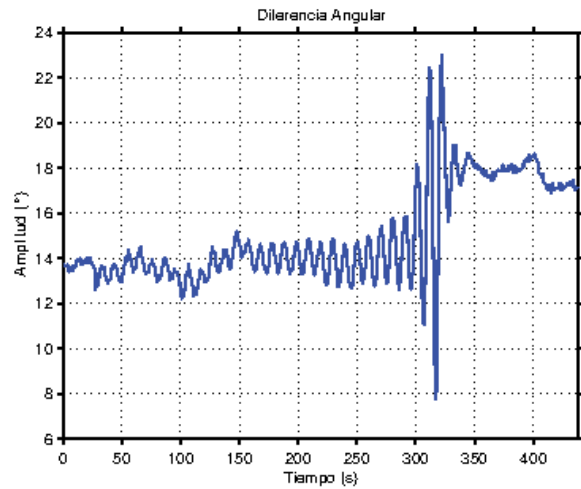


Fig. 3. Señal de diferencia angular a analizar.

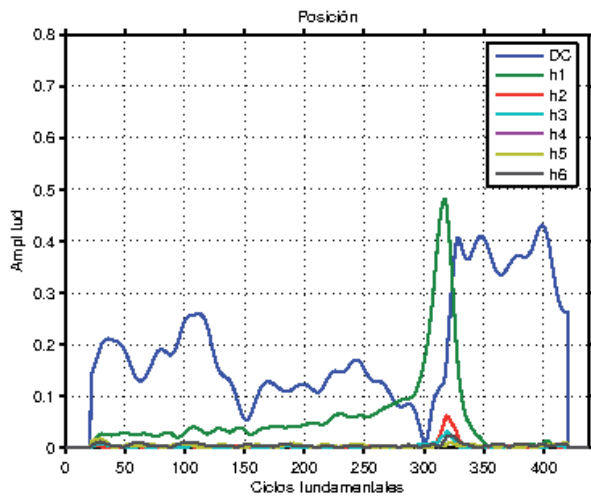


Fig. 4. Estimado armónico de la señal de diferencia angular.

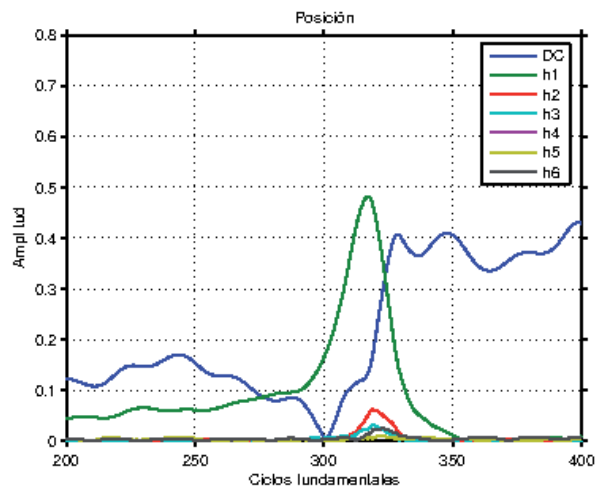


Fig. 5. Detalle del estimado armónico de la señal de diferencia angular.

el uso del RAT se muestran en las tablas I, II y III respectivamente; donde se puede ver que los modos presentes en la señal poseen frecuencias alrededor de la frecuencia fundamental de la señal, de su segunda armónica y de su componente de DC; además de las componentes frecuenciales originadas por el ruido.

Como puede observarse en la tabla I, los valores de amortiguamiento ($\sigma/2\pi$) inestables son muy pequeños, mientras que en la tabla II, dichos valores son mayores lo que provoca el gran incremento de la amplitud de la oscilación. En la tabla III, se tienen dos modos inestables con un valor de ($\sigma/2\pi$) inestable muy pequeño, estos valores se presentan debido a las componentes de baja frecuencia y el ruido que contiene la señal, además de la fluctuación de la que es objeto. Estos resultados, servirán como referencia para llevar a cabo una comparación con los resultados obtenidos mediante la aplicación de la DTFT utilizando un algoritmo usado en relevadores digitales, lo cual se verá en la siguiente sección. Cabe mencionar que la DTFT requiere de muchos menos parámetros que los requeridos por el método de Prony para detectar situaciones de inestabilidad.

Utilizando los modos de oscilación de las tablas anteriores, se obtiene el estimado de Prony para la señal de diferencia angular, el cual es mostrado en la figura 6 junto con la señal original para apreciar la precisión del estimado de Prony.

Tabla. II. Modos de 276 a 315s de la señal de δ .

Modo	Frecuencia (Hz)	$\left(\frac{\sigma}{2\pi}\right)$	Amplitud	Fase ()
1	0	0.000857	13.181167	0
2	0	-0.034608	2.155654	0
3	0.095446	-0.02557	2.087563	177.614005
4	0.191509	-0.020137	0.250499	-109.787112
5	0.095037	0.01146	0.497172	-146.40167

Tabla. III. Modos de 316 a 438s de la señal de δ .

Modo	Frecuencia (Hz)	$\left(\frac{\sigma}{2\pi}\right)$	Amplitud	Fase ()
1	0	-0.000034	18.113022	0
2	0	-0.030766	0.830064	180
3	0.071828	-0.012235	1.218225	-30.035962
4	0.088918	-0.022222	14.24176	115.085297
5	0.099997	-0.0016	0.099514	122.031029
6	0.164296	-0.009956	0.283968	-0.587095
7	0.18425	-0.004373	0.109919	-25.546018
8	0.206488	-0.003592	0.108179	-102.154816
9	0.0175	0.002763	0.112132	-138.828181
10	0.038706	0.001032	0.174277	97.731734

Tabla. I. Modos de los primeros 275s de la señal de δ .

Modo	Frecuencia (Hz)	$\left(\frac{\sigma}{2\pi}\right)$	Amplitud	Fase (°)
1	0	0.000041	13.2247740	0
2	0.007776	-0.000742	0.63096	-110.044577
3	0.014839	-0.000805	0.551236	-37.606561
4	0.081023	-0.002859	0.166958	170.64971
5	0.091686	-0.001578	0.254971	54.730393
6	0.104701	-0.000919	0.098818	-109.617844
7	0.120496	-0.003132	0.102482	-15.697306
8	0.185376	-0.000774	0.025274	-170.294103
9	0.195223	-0.003001	0.04907	11.024084
10	0.208295	-0.000034	0.022325	130.038795
11	0.217382	-0.000523	0.023043	-86.516272
12	0.09774	0.000962	0.231554	-118.723731

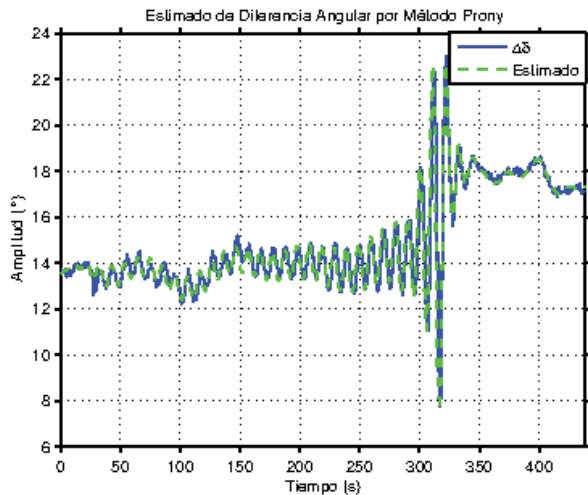


Fig. 6. Estimado de la señal δ mediante el método Prony.

ALGORITMO DE DETECCIÓN DE OSCILACIONES DE POTENCIA

En esta sección se presentan las bases teóricas de los criterios de estabilidad basados en la diferencia angular y sus primeras dos derivadas para construir un plano de fase que nos permita generar una alarma que indique cuando el SEP está operando en condiciones inestables y tomar acciones remediales necesarias para proteger el sistema.

A diferencia de las estimaciones sugeridas en las referencias^{14,26,27} se aplicará la DTFT para obtener las estimaciones de las derivadas de la diferencia angular que nos permite vigilar el desempeño estable o inestable del SEP. Los resultados serán comparados con los obtenidos por el método de Prony.

Las dinámicas de interés para la estabilidad del SEP dependen de las ecuaciones de energía mecánica para las máquinas, y de las ecuaciones de intercambio de potencia eléctrica para la red que interconecta las máquinas. La potencia eléctrica de transferencia para una máquina y un bus infinito está dada por:

$$P_e = \frac{|E_1 E_2|}{X} \sin \delta \quad (8)$$

La potencia de transferencia viene de un primo motor como potencia mecánica, P_m . En condiciones de operación en estado estable, las potencias eléctrica y mecánica son iguales, despreciando las pérdidas de conversión de energía. La máxima potencia que se puede transferir se obtiene cuando $\delta = \pi/2$.^{16,17} Sin embargo, cuando ocurren fallas, switcheo o cualquier

otro disturbio, las potencias eléctrica y mecánica son diferentes. El exceso de potencia mecánica provoca que el rotor se acelere, dando origen a un par acelerante dado por:

$$P_a = P_m - P_e \quad (9)$$

La relación entre el par acelerante y el movimiento de la máquina se obtiene diferenciando la energía cinética del rotor. Dando lugar así, a la ecuación de oscilación, la cual representa las oscilaciones en el ángulo del rotor δ durante los disturbios.

$$\ddot{\delta} = \left(\frac{\omega_0}{2H_0} \right) P_a = \frac{\omega_0}{2H_0} \left(P_m - \frac{|E_1 E_2|}{X} \sin \delta \right) \quad (10)$$

Si se tiene un valor de equilibrio estable para δ , en $\delta = \delta_0$, este debe ser el valor para el cual las potencias eléctrica y mecánica son iguales. Por lo que la potencia mecánica estaría dada para este caso como:

$$P_m = \frac{|E_1 E_2|}{X} \sin \delta_0 \quad (11)$$

por lo que la ecuación de oscilación queda de la siguiente forma, la cual es análoga a la ecuación del péndulo sin amortiguamiento.

$$\ddot{\delta} = \omega_n^2 (\sin \delta_0 - \sin \delta) \quad (12)$$

donde ω_n^2 es el cuadrado de la frecuencia natural de oscilación del sistema:

$$\omega_n^2 = \frac{|E_1 E_2| \omega_0}{2H_0 X} \quad (13)$$

En la figura 7, se muestra la intersección entre la curva dada por (8) y la línea de potencia mecánica

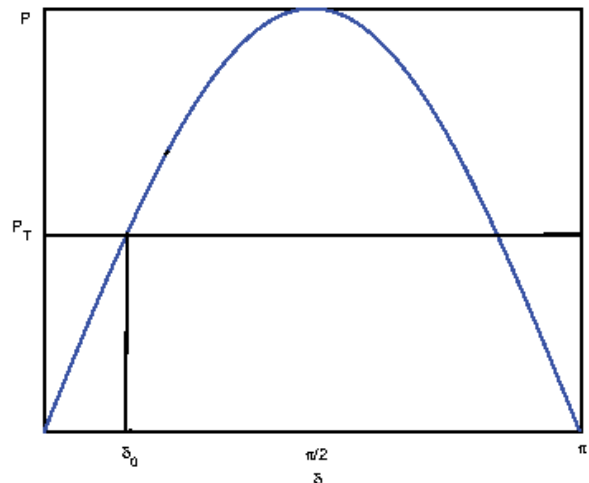


Fig. 7. Característica potencia-ángulo para un sistema de una máquina.

en δ_0 . Dicho punto es un punto de equilibrio, ya que las potencias eléctrica y mecánica son iguales y es estable porque la aceleración produce una fuerza restauradora. Lo cual se comprueba con la ecuación (12), ya que si δ se incrementa desde su valor en estado estable δ_0 , provocando que sin δ se incremente por encima de sin δ_0 , resultando en aceleración negativa, la que compensa el disturbio original.

Dada la simetría de la curva, se tiene otro punto de equilibrio después de los $\pi/2$ radianes, el cual es inestable debido a que una pequeña $\ddot{\delta}$ causa que δ se incremente y la potencia eléctrica disminuya dejando una potencia acelerante en la red. Debido a la simetría de la curva, los puntos de equilibrio estable e inestable están en δ_0 y $\pi-\delta_0$ respectivamente.

Considerando un retrato de fases del ángulo de potencia δ contra su primer derivada $\dot{\delta}$ y suponiendo que no hay amortiguamiento, la oscilación produce una trayectoria cerrada llamada centro. Sin embargo, si existe amortiguamiento en la oscilación, la trayectoria formada en el retrato de fases es una espiral que va hacia un nuevo punto de equilibrio que puede ser estable o inestable (foco estable o inestable).

Estas trayectorias de los planos de fase están limitadas a cuando la amplitud de la oscilación es máxima y se mantiene constante.

Detección de oscilaciones de potencia

Las decisiones acerca de la recuperabilidad de una oscilación deben ser hechas en ángulos críticos de tal forma que las acciones de mejora de estabilidad puedan ser tomadas antes de que sea muy tarde y la separación del sistema, si es necesaria, se lleve a cabo en un ángulo seguro para los interruptores.

Si la oscilación es declarada como recuperable, entonces se descarta el disparo de generación, y posiblemente la oscilación se relaje a un nuevo punto de equilibrio. De otro modo, si la oscilación es declarada no recuperable, entonces el relevador debe ordenar el disparo de generación. Con menos generación, la reactancia de la fuente en el lado de generación se incrementa, y el relevador debe reconocer la nueva configuración del sistema. Si la acción de disparo de generación es exitosa, entonces el sistema se recupera posicionándose en un nuevo punto de equilibrio. De lo contrario,

la próxima acción es proteger el sistema abriendo interruptores.

La estabilidad no se puede evaluar solamente inspeccionando el ángulo y su razón de cambio, dado que no se conoce δ_0 , el nuevo ángulo de equilibrio. Debe tenerse en cuenta que las oscilaciones estables para este punto de equilibrio las trayectorias son convergentes, y las inestables son divergentes.^{28,29} Si no se conoce δ_0 , se debe considerar el comportamiento de las trayectorias de otras oscilaciones relacionadas a diferentes valores de δ_0 .

Un plano de fases $\delta-\dot{\delta}$ puede dar información de cuándo debe aplicarse la decisión de recuperabilidad, pero dicho plano no nos dice cómo decidir. A excepción de que $\dot{\delta}$ sobrepase el valor de $2\omega_n$, el cual es la tasa máxima de oscilación.

Se necesita un criterio de decisión de estabilidad para aplicar en el instante mencionado previamente. Este algoritmo involucra a la diferencia angular, la frecuencia (primera derivada) y su aceleración (segunda derivada).¹⁴ Este método monitorea la frecuencia (S_{fk}) y su derivada (A_{fk}) entre dos puntos de un sistema de potencia en intervalos constantes, comenzando el cálculo de S_{fk} y A_{fk} cuando se cumplen ciertas condiciones de operación existentes.

S_{fk} y A_{fk} se pueden emplear combinándolos en un plano de fase. En estado estable S_{fk} y A_{fk} son cero y (0,0) es el punto de operación. Cuando una fuente se separa del resto del SEP, S_{fk} y A_{fk} toman un valor. La magnitud de cada uno puede impulsar la cantidad operativa en la región de operación de la característica OOST. Este algoritmo se implementa en los relevadores digitales que detectan oscilaciones de potencia.²⁷

Los cálculos de los parámetros necesarios para establecer la condición de operación del sistema son los siguientes:¹⁴

$$\delta_k = V_{1Angk}^{Relevador1} - V_{1Angk}^{Relevador2} \quad (14)$$

$$S_{fk} = \frac{\delta_k - \delta_{k-1}}{360} M_{Tasa} \quad (15)$$

$$A_{fk} = (S_{fk} - S_{fk-1}) \cdot M_{Tasa} \quad (16)$$

donde:

$V_{1Angk}^{Relevador1}$ es el ángulo del voltaje de secuencia positiva del relevador 1 en el k-ésimo intervalo de procesamiento.

$V_{1Angk}^{Relevador2}$ es el ángulo del voltaje de secuencia positiva del relevador 2 en el k-ésimo intervalo de procesamiento.

S_{fk} es la frecuencia de desplazamiento en el k-ésimo intervalo de procesamiento.

A_{fk} es la aceleración en el k-ésimo intervalo de procesamiento.

M_{Tasa} es la tasa de muestreo de los sincrofasores.

Una característica S_{fk} vs A_{fk} puede definir regiones en casos donde ocurren bajas y altas frecuencias simultáneamente con altas o bajas razones de cambio de frecuencia. En la figura 8 se muestra la característica empleada para la detección de oscilaciones inestables en las referencias^{14,27}. Dicha característica, también será utilizada en la aplicación de la DTFT.

La característica del elemento OOST en la figura 8 usa la ecuación (17) para definir la región inestable. Esta característica es desarrollada en la referencia²⁶ e identifica oscilaciones inestables antes de que la condición OOS ocurra, dando lugar al esquema de protección del sistema para tomar acciones remediales inmediatas.²⁷

$$A_{fk} > 78_{Pendiente} \cdot S_{fk} + A_{Desv} \quad (17)$$

La ventaja de este algoritmo es que no se requiere saber los parámetros de la red del SEP ni la información acerca de la topología de la red para calcular la diferencia angular, la frecuencia y su aceleración.

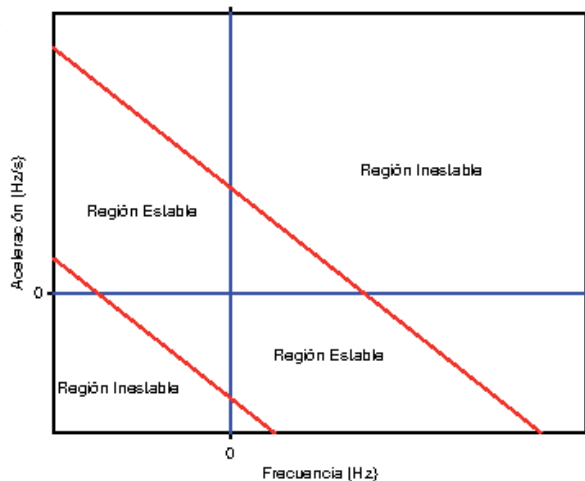


Fig. 8. Característica del elemento OOST que define la región de operación estable del sistema eléctrico de potencia.

Como se ha mencionado anteriormente, los parámetros de frecuencia y aceleración (segunda derivada) de la diferencia angular son indispensables para elaborar un retrato de fases y con ello determinar si el SEP presenta una operación estable o inestable. Por lo que se trabajará con la diferencia angular entre dos puntos del SEP, la cual se mostró en la figura 2 por lo que se usará a DTFT en lugar de las ecuaciones (14)-(16), las cuales ofrecen estimaciones susceptibles al ruido por estar basadas en ecuaciones en diferencias finitas.

A diferencia de la sección anterior, donde la señal se normalizó para obtener sus componentes armónicas, la señal se utilizará tal y como es obtenida de los PMUs, es decir, sin restarle la media aritmética ni normalizarla. Como esta señal ya es la diferencia angular, se utilizará el algoritmo de diferenciadores máximamente lisos mediante Taylor LS para estimar las primeras dos derivadas de la señal y así construir el retrato de fases. Dado que la señal presenta una segunda armónica, usa un polinomio de Taylor de orden $k=4$ para que sus componentes frecuenciales estén dentro de la banda de paso de los diferenciadores y la estimación de la señal como de sus derivadas sea más precisa.

En la figura 9 se muestra el estimado de la señal usando un polinomio de Taylor de orden $k=4$. Como puede observarse, el estimado es muy preciso y el ruido de la señal es atenuado por el filtro del diferenciador de orden 0.

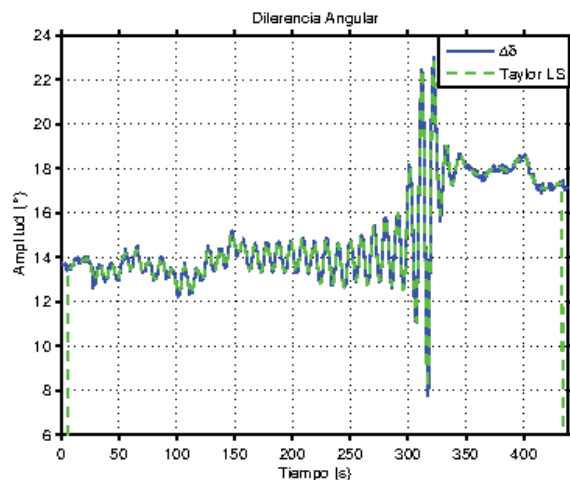


Fig. 9. Estimado de la señal δ mediante descomposición de Taylor LS.

Tomando la ecuación (17) y asignándole valores de $A_{Desv}=\pm 10$ y $78Pendiente=-15$ se establecen las regiones estables e inestables, obteniendo el retrato de fases mostrado en la figura 10.

Como se puede observar en el retrato de fase, las oscilaciones producidas en la señal sobrepasan el margen de estabilidad puesto por el criterio usado en la referencia¹⁴, por lo que el sistema está operando en una condición de inestabilidad lo cual concuerda con lo observado en los modos de oscilación obtenidos mediante el método de Prony, los cuales fueron mostrados en las tablas I, II y III de la sección anterior.

Tomando los primeros 315s de la señal se traza su retrato de fase y se observa la dinámica de la oscilación, la cual está dada por las flechas en la figura 11.

La gráfica mostrada en el retrato de fase de la figura 10 es conocida como foco inestable ya que la trayectoria de la espiral es una trayectoria divergente indicando la inestabilidad de la oscilación. Esto coincide con los resultados obtenidos con Prony para los primeros dos intervalos y que fueron mostrados en las tablas I y II.

Al tomar los últimos 123s de la señal y trazar su retrato de fase, se obtiene lo mostrado en la figura 12.

La gráfica mostrada en el retrato de fases de la figura 12 es conocida como foco estable ya que su trayectoria, al contrario del foco inestable, es convergente indicando la estabilidad de la oscilación, la cual llega a un punto de equilibrio. Se puede apreciar en la figura que la espiral presenta partes de su trayectoria fuera del margen propuesto. Sin embargo, la trayectoria no está muy alejada del margen y termina por llegar a un punto de equilibrio dentro del mismo. Esto coincide con los resultados obtenidos mediante el método de Prony para este intervalo, donde también hay dos modos inestables, pero con valores de $(\sigma/2\pi)$ muy pequeños, y se llega a un punto de equilibrio estable. Estos resultados se muestran en la tabla III.

CONCLUSIONES

Se ha presentado una aplicación de la DTFT a la estabilidad de SEP, mediante un algoritmo que involucra la diferencia angular entre dos puntos del sistema y sus primeras dos derivadas utilizado en

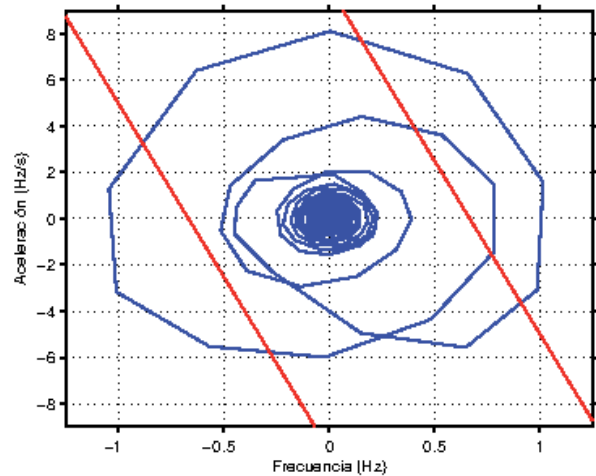


Fig. 10. Plano de fase aceleración vs frecuencia de la señal δ .

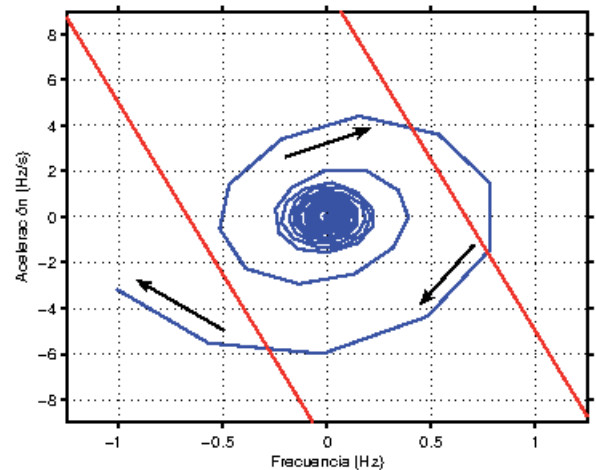


Fig. 11. Plano de fase de los primeros 315s de la oscilación.

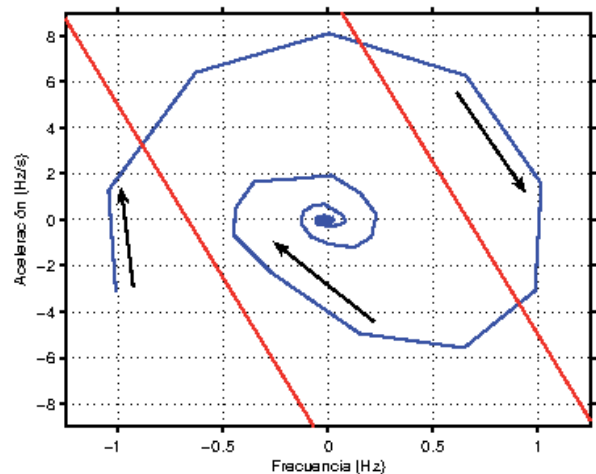


Fig. 12. Plano de fase de la parte amortiguada de la oscilación.

algunos relevadores digitales. Así como también se vieron algunos resultados numéricos obtenidos al efectuar estimaciones armónicas de una señal de campo real. Dichos resultados son útiles para establecer un orden adecuado del polinomio de Taylor que se usará en los diferenciadores máximamente lisos aplicados a la señal de ángulo. Estos resultados fueron comparados por los obtenidos usando el método de Prony, el cual se usó como referencia en el análisis de estabilidad del SEP dado que es un método que trabaja en una forma más directa con señales.

La ventaja que proporciona el uso de la DTFT como estimador radica en la precisión lograda en los estimados tanto armónicos como fasoriales y es un algoritmo que puede utilizarse en la detección de oscilaciones estables e inestables ya que proporciona no solo un estimado de la amplitud y fase de la señal, sino que también proporciona muy buenos estimados de las derivadas de estos parámetros así como de la señal misma cuando se trabaja con diferenciadores máximamente lisos mediante Taylor LS en $\omega=0$ a condición de que el espectro de la señal de entrada caiga bajo las ganancias de diferenciación ideales, estos estimados son más robustos al ruido si se les compara con los estimadores basados en ecuaciones de diferencias finitas. En particular los estimados de frecuencia instantánea bajo oscilaciones son bastante aproximados. Cabe mencionar que la DTFT presenta la limitante de un retraso de dos ciclos, por lo que no es un método aplicable a protecciones digitales, ya que los dispositivos de hoy en día llevan a cabo las estimaciones con un retraso de un ciclo.³⁰ Sin embargo, se cuenta con otra alternativa la cual puede llevar a cabo estimaciones instantáneas.³¹ Otra limitante es que el error de los estimados se incrementa cuando hay discontinuidades o transitorios en el intervalo de observación. En este caso, el espectro de la señal se ensancha sobrepasando la banda frecuencial con las ganancias máximamente lisas.

Dicha aplicación mostrada tiene la ventaja de que no se requiere conocer la configuración que posee el SEP. Los resultados obtenidos en la aplicación de la DTFT a este algoritmo coinciden con los resultados obtenidos mediante el método de Prony por lo que la aplicación de la DTFT representa una alternativa mucho más simple para detectar oscilaciones estables e inestables, esto debido a que depende solamente de las estimaciones de velocidad y aceleración de

la diferencia angular. La precisión de los estimados que se logran con la DTFT hace posible contar con una alarma confiable en el caso de que se presente una oscilación inestable en el SEP.

REFERENCIAS

1. M. A. Platas and J. de la O, Dynamic Harmonic Analysis Through Taylor-Fourier Transform, *IEEE Trans. on Instrumentation and Measurement*. Vol. 60 No. 6, March 2011, pp. 804-813.
2. P. M. Anderson, M. Mirheydar. An Adaptive Method for Setting Underfrequency Load-Shedding Relays, *IEEE Trans. on Power Systems*. Vol. 7 No. 2, May 1992, pp. 647-655.
3. U. Rudez, R. Mihalic. Monitoring the First Frequency Derivative to Improve Adaptive Underfrequency Load-Shedding Schemes, *IEEE Trans. on Power Systems*. Vol. 26 No. 2, May 2011, pp. 839-846.
4. K. Sun, S. Likhate, V. Vittal, V. S. Kolluri, S. Mandal. An Online Dynamic Security Assessment Scheme Using Phasor Measurements and Decision Trees, *IEEE Trans. on Power Systems*. Vol. 22 No. 4, December 2007, pp. 1935-1943.
5. R. Diao, V. Vittal, N. Logic. Design of a Real-Time Security Assessment Tool for Situational Awareness Enhancement in Modern Power Systems, *IEEE Trans. on Power Systems*. Vol. 25 No. 2, May 2010, pp. 957-965.
6. A. D. Rajapakse, F. Gómez, K. Nanayakkara, P. A. Crossley, V. V. Terzija. Rotor Angle Instability Prediction Using Post-Disturbance Voltage Trajectories, *IEEE Trans. on Power Systems*. Vol. 25 No. 2, May 2010, pp. 947-956.
7. A. R. Messina, V. Vittal, D. Ruiz, G. Enríquez. Interpretation and Visualization of Wide-Area PMU Measurements Using Hilbert Analysis, *IEEE Trans. on Power Systems*. Vol. 21 No. 4, November 2006, pp. 1763-1771.
8. Y. Gong, A. Guzmán. Synchrophasor-Based Online Modal Analysis to Mitigate Power System Interarea Oscillation, in *2009 Distributed Conference Proceedings*.
9. N. Kakimoto, M. Sugumi, T. Makino, K. Tomiyama. Monitoring of Interarea Oscillation Mode by Synchronized Phasor Measurement,

- IEEE Trans. on Power Systems. Vol. 21 No. 1, February 2006, pp. 260-268.
10. A. G. Bahbah, A. A. Girgis. New Method for Generator's Angles and Angular Velocities Prediction for Transient Stability Assessment of Multimachine Power Systems Using Recurrent Artificial Neural Network, IEEE Trans. on Power Systems. Vol. 19 No. 2, May 2004, pp. 1015-1022.
 11. M. Uzunoglu, C. Kocatepe, R. Yumurtaci, K. Gulez. The Effects of Harmonics on Voltage Stability, IEEJ Trans. Inst. Elect. Eng. Jpn. B122: 2002, pp. 616-621.
 12. R. C. Dugan, M. F. Granaghan, S. Santoso, H. W. Beaty. Electrical Power Systems Quality, McGraw Hill, 2nd. Edition, 2004.
 13. M. A. Platas. Una Extensión a la Transformada de Fourier, la Transformada Taylor-Fourier, Tesis de Doctorado, 2011.
 14. E. O. Schweitzer III, D. Whitehead, A. Guzmán, Y. Gong, M. Donolo. Advanced Real-Time Synchrophasors Applications, Proceedings of the 35th Annual Western Protective Relay Conference, Spokane, WA, October 2008.
 15. E. O. Schweitzer III, A. Guzmán, H. J. Altuve, D. A. Tziouvaras. Real-Time Synchrophasor Applications for Wide-Area Protection, Control, and Monitoring. Available at <http://www.selinc.com/WorkArea/DownloadAsset.aspx?id=6388>.
 16. Prabha S. Kundur. Power System Stability and Control, McGraw Hill, 1994.
 17. P. M. Anderson, A. A. Fouad. Power System Control and Stability, IEEE Press, 2nd Edition, 2003.
 18. J. de la O. Dynamic Phasor Estimates for Power System Oscillations, IEEE Trans. on Instrumentation and Measurement. Vol. 56, No. 5, October 2007, pp. 1648-1657.
 19. J. de la O. Calculating Taylor-Fourier Transform with FFT, Reporte interno, Mayo 2010.
 20. J. de la O, M. A. Platas. Maximally Flat Differentiators Through WLS Taylor Decomposition, Elsevier, Digital Signal Process, 21(2), March 2011.
 21. Li Qi, Lewei Qian, Stephen Woodruff, David Cartes. Prony Analysis for Power System Transient Harmonics, EURASIP Journal on Advances in Signal Processing. Vol. 2007, Article ID 48406, 2007.
 22. L. Scharf. Statistical Signal Processing: Detection, Estimation and Time Series Analysis, Addison-Wesley Publishing Company, 1991, pp. 484-513.
 23. Manuel Antonio Andrade Soto. Aplicación de los Métodos de Identificación de Hilbert y Prony al Estudio de Fenómenos Oscilatorios en Sistemas Eléctricos de Potencia, Tesis de Maestría, 2002, pp. 25.
 24. John Hauer, Louis Scharf, Dan Trudnowski, Jeff Johnson and Ning Zhou. DSI Toolbox: PSM Tool and Ringdown Analysis Tool, Available for free at <http://www.naspi.org/resources/pitt/pittresources.stm>
 25. Jeffrey M. Johnson, Daniel Trudnowski. DSITools Ringdown Analysis Tool Users Manual, Battelle Memorial Institute. Vol. 2, 1995-1998.
 26. E. O. Schweitzer III, Timothy T. Newton, Richard A. Baker. Power Swing Relay Also Records Disturbances, Proceedings of the 13th Annual Western Protective Relay Conference, Spokane, WA, October 1986, pp. 1995-1998.
 27. A. Guzmán, V. Mynam, G. Zweigle. Backup Transmission Line Protection for Ground Faults and Power Swing Detection Using Synchrophasors, Proceedings of the 34th Annual Western Protective Relay Conference, Spokane, WA, October 2007.
 28. Hassan K. Khalil. Non Linear Systems, Prentice Hall, 3rd Edition, 2002.
 29. Dennis G. Zill, Michael R. Cullen. Matemáticas Avanzadas para Ingeniería, Vol. 1 Ecuaciones Diferenciales, McGraw Hill, Tercera Edición, 2008.
 30. E. O. Schweitzer III, D. E. Whitehead. Real-Time Power System Control Using Synchrophasors, 61st Annual Conference for Protective Relay Engineers, 2008, pp. 78-88.
 31. J. A. de la O, J. Rodríguez, Taylor-Kalman-Fourier Filters for Instantaneous Oscillating Phasor and Harmonic Estimates, IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, Vol. 61, No. 4, April 2012, pp. 941-951.