

**DIAGNÓSTICO DE FALLAS EN SISTEMAS DE TRANSMISIÓN POR MEDIO DEL ALGORITMO  
DE PRONY**



**UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA  
SEDE QUITO**

**CARRERA:  
INGENIERÍA ELÉCTRICA**

**Trabajo de titulación previo a la obtención del título de  
INGENIERO ELÉCTRICO**

**TEMA:  
DIAGNÓSTICO DE FALLAS EN SISTEMAS DE TRANSMISIÓN POR MEDIO  
DEL ALGORITMO DE PRONY**

**AUTOR:  
STALIN VLADIMIR GÓMEZ ALBÁN**

**DIRECTOR:  
DIEGO FRANCISCO CARRIÓN GALARZA**

**Quito, septiembre 2016**

Stalin Vladimir Gómez Albán

**DIAGNÓSTICO DE FALLAS EN SISTEMAS DE TRANSMISIÓN POR MEDIO  
DEL ALGORITMO DE PRONY**

Universidad Politécnica Salesiana  
Ingeniería Eléctrica

Breve reseña historia e información de contacto:



**Stalin Vladimir Gómez Albán** (Y'1991-M'11). Realizó sus estudios secundarios la Unidad Educativa Julio María Matovelle. Egresado de la Carrera de Ingeniería Eléctrica de la Universidad Politécnica Salesiana. Su trabajo se basa en técnicas de análisis modal y simulación matemática orientada al Diagnóstico de Fallas en los Sistemas de Transmisión Eléctrica.

[sgomeza@est.ups.edu.ec](mailto:sgomeza@est.ups.edu.ec)

Dirigido por:



**Diego Francisco Carrión Galarza** (Y'1981-SM'12). Se graduó en Ingeniería Eléctrica de la Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador en 2010 y en la actualidad está trabajando para lograr su título de Doctor en Ingeniería de la Universidad Pontificia Bolivariana - Medellín Colombia. Es profesor e investigador en la Universidad Politécnica Salesiana - Quito Ecuador. En la actualidad es miembro del Grupo de Investigación Girei (Grupo de Investigación en Redes Eléctricas Inteligentes - Smart Grid Research Group).

[dcarrion@ups.edu.ec](mailto:dcarrion@ups.edu.ec)

Todos los derechos reservados:

Queda prohibida, salvo excepción prevista en la ley, cualquier forma de reproducción, distribución, comunicación pública y transformación de esta obra para fines comerciales, sin contar con la autorización de los titulares de propiedad intelectual. La infracción de los derechos mencionados puede ser constitutiva de delito contra la propiedad intelectual. Se permite la libre difusión de este texto con fines académicos o investigativos por cualquier medio, con la debida notificación a los autores.

**DERECHOS RESERVADOS**

©2016 Universidad Politécnica Salesiana

QUITO-ECUADOR

## DEDICATORIA.

*Stalin Vladimir Gómez Albán*

*Dedico este trabajo a Dios y a mis padres Estalin Gómez e Italia Albán, quienes me acompañaron en todo momento en el transcurso a lo largo de mi carrera, siendo un apoyo total, brindándome su amor incondicional, sustento económico y orientación para no desistir de mi meta. Dedico a mi abuelita Hilda Sánchez como gratitud por haberme inculcado la educación en valores y darme una rica y deliciosa alimentación para poder desempeñarme exitosamente. Además dedico a mis tíos, quienes me han apoyado moralmente a no desistir de mi sueño y llenarme de valentía para nunca rendirme. Además debo agradecer infinitamente al Padre Francisco Nieto por aumentar mi fe y devoción a Dios, ya que me ha ayudado mucho a enfrentar varios problemas de mi vida. Finalmente, dedico esta investigación a mis abuelitos fallecidos Jorge Albán y Marina Herrera, que fueron fuente de inspiración en mi vida, y me amaron mucho y desde el cielo me brindan luz para seguir adelante.*

## **AGRADECIMIENTO.**

*Stalin Vladimir Gómez Albán*

*Agradezco en primer lugar a Dios por darme la oportunidad de vivir este momento tan especial de ser profesional; agradezco a mi padre Stalin y a mi madre Italia por apoyarme y darme la educación y la manutención. Agradezco enormemente a mi tutor y docente; Ing. Diego Carrión, quien con su gran conocimiento, excelente calidad de persona y su experiencia como investigador me guio y compartió sus conocimientos generosamente para poder hacer posible que este trabajo se realice exitosamente. Agradezco a todos los docentes a lo largo de mi carrera en la Universidad Politécnica Salesiana, ya que han sido excelentes maestros en cada materia y me han impartido con sinceridad conocimientos sólidos y de mucho potencial en la Ingeniería Eléctrica.*

## **DECLARATORIA DE COAUTORÍA DEL DOCENTE TUTOR/A**

Yo, Diego Francisco Carrión Galarza declaro que bajo mi dirección y asesoría fue desarrollado el trabajo de titulación *Diagnóstico de Fallas en Sistemas de Transmisión por medio del Algoritmo de Prony* realizado por Stalin Vladimir Gómez Albán, obteniendo un producto que cumple con todos los requisitos estipulados por la Universidad Politécnica Salesiana para ser considerados como trabajo final de titulación.

Quito, septiembre 2016



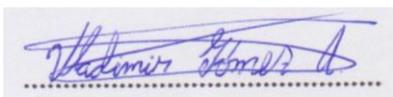
Diego Francisco Carrión Galarza  
Cédula de identidad: 1713703062

## **CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR**

Yo, Stalin Vladimir Gómez Albán, con documento de identificación N° 1722698436, manifiesto mi voluntad y cedo a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que soy autor del trabajo de titulación intitulado: “Diagnóstico de fallas en sistemas de transmisión por medio del algoritmo de Prony”, mismo que ha sido desarrollado para optar por el título de: Ingeniero Eléctrico, en la Universidad Politécnica Salesiana, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente.

En aplicación a lo determinado en la Ley de Propiedad Intelectual, en mi condición de autor me reservo los derechos morales de la obra antes citada. En concordancia, suscribo este documento en el momento que hago entrega del trabajo final en formato impreso y digital a la Biblioteca de la Universidad Politécnica Salesiana.

Firma



Nombre: Stalin Vladimir Gómez Albán

Cédula: 1722698436

Fecha: Quito, septiembre 2016

## **1. INDICE GENERAL**

### **CONTENIDO**

1. <i>INDICE GENERAL</i> .....	vii
2. <i>INDICE DE FIGURAS</i> .....	vii
3. <i>INDICE DE TABLAS</i> .....	vii
DIAGNÓSTICO DE FALLAS EN SISTEMAS DE TRANSMISIÓN POR MEDIO DEL ALGORITMO DE PRONY .....	1
Resumen.....	1
Abstract .....	1
1. Introducción .....	2
2. Algoritmo de Prony aplicado a líneas de transmisión.....	3
3. Formulación del Problema mediante el método de Prony .....	4
4. Análisis de los Resultados.....	5
5. Conclusiones .....	6
Referencias.....	6
6. Estado del Arte.....	10

## **2. INDICE DE FIGURAS**

Figura 1. Diagnóstico de Fallas en un SEP de transmisión mediante Prony. ....	3
Figura 2. Corrientes de fase del sistema de 4 Barras IEEE simuladas en DIgSILENT.....	3
Figura 3. Corrientes de fase del sistema de 4 Barras IEEE simuladas en DIgSILENT.....	4
Figura 4. Sistema Eléctrico de Potencia de 14 Barras de IEEE.....	6
Figura 5. Corriente de fase basada en Prony del sistema de 14 Barras IEEE.....	6

## **3. INDICE DE TABLAS**

TABLA 1.- Matriz de estado del arte.....	10
TABLA 2.- Resumen e Indicadores del estado del arte.....	11

# DIAGNÓSTICO DE FALLAS EN SISTEMAS DE TRANSMISIÓN POR MEDIO DEL ALGORITMO DE PRONY

## Resumen

En este documento se presenta un método de diagnóstico de fallas en sistemas de transmisión, que son los encargados de llevar la potencia desde las estaciones de generación hacia los consumidores. Este trabajo se enfoca en un método para el diagnóstico de fallas en los sistemas de transmisión ya que la localización de inconvenientes en períodos de tiempo muy pequeños nos permite analizar y tomar decisiones preventivas para despejar una falla y producir el menor daño a los equipos y al personal. La restauración del SEP sería menos probable ya que se tiene un método eficiente para el diagnóstico de fallas. Se analizan variables como son los voltajes pre y post-falla, ángulos de desfase de corriente. Se simula un método de ubicación para obtener una imagen más precisa y real del comportamiento del sistema frente a perturbaciones. Se espera que el método propuesto tenga una amplia gama de aplicaciones en la ingeniería eléctrica y mejore el comportamiento del SEP.

**Palabras Clave:** Algoritmo de Prony, diagnóstico, falla, líneas de transmisión, localización de fallas, predicción de fallas, confiabilidad.

## Abstract

This document describes a method of troubleshooting in transmission systems, which are responsible for carrying power from generating stations to consumer stations is presented. This work focuses on a method for diagnosing faults in transmission systems and the location of problems within very small time allows us to analyze and take preventive decisions to clear a fault and cause the least damage to equipment and personal. The restoration of the SEP would be less likely since it is an efficient method for troubleshooting. Parameters are analyzed such as pre and post-fault current phase angles voltages. A location method is simulated to obtain a more accurate and actual behavior against interference system image. It is expected that the proposed method has a wide range of application in engineering and improve SEP behavior.

**Keywords:** Prony algorithm, diagnostics, fault, transmission lines, troubleshooting, failure prediction, reliability.

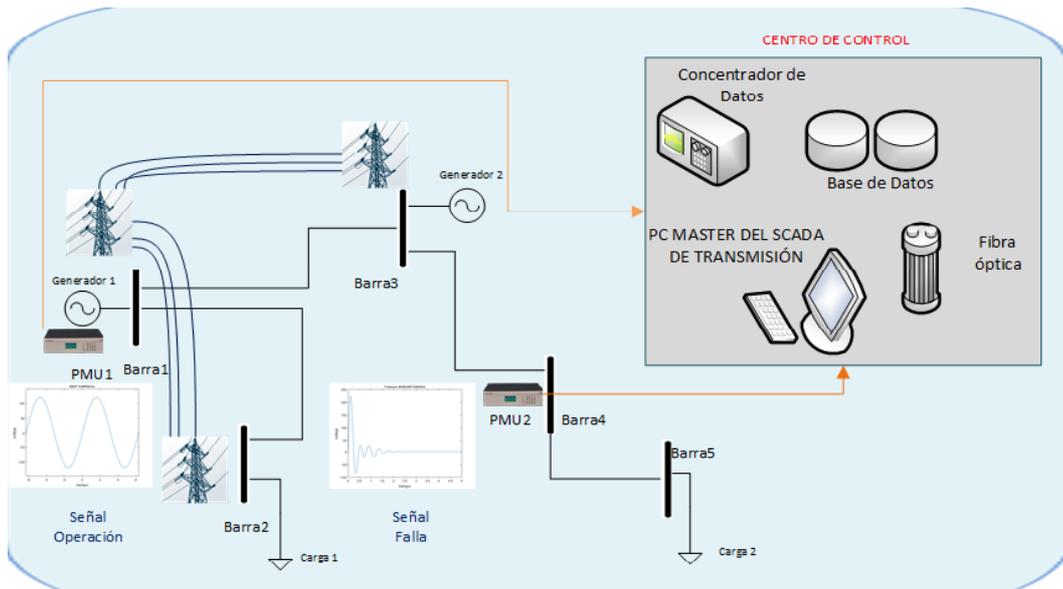
## 1. Introducción

La localización y la predicción de fallas, es una tarea fundamental cuando una perturbación severa es causada por la falta de aislamiento en una línea de transmisión. Con el fin de optimizar y llegar a costos más económicos debido a las interrupciones de carga, el sistema debe ser capaz de restituirse lo más pronto posible. Este artículo se va a enfocar en la estabilidad de la frecuencia, es decir en un equilibrio entre generación y carga. Las redes eléctricas inteligentes han tenido éxito en el tratamiento de problemas de diagnóstico de fallas [1], [2]. Las líneas de transmisión son algunos de los componentes del sistema eléctrico de potencia con la tasa de incidencia más alta de fallas, principalmente a causa de la influencia del clima. Con el fin de acelerar la restauración de la operación normal después del despeje de fallas mediante dispositivos de protección, es importante determinar la ubicación de la falla tan pronto como sea posible [3]. Por otro lado, la precisión de la localización de fallas de forma automática depende de la calidad de la adquisición de datos y su procesamiento [4]. Un caso común que hace más difícil la localización de fallas, y por lo general relacionados con las interconexiones, es cuando las grabaciones de fallas en línea están disponibles en un solo terminal. En tales casos, la localización de fallas está basado en la solución de ecuaciones [5].

Algunas propuestas de ubicación de fallas se aplica el análisis en el dominio de frecuencias, a la frecuencia fundamental, para las tensiones de pre y post falla así como a los fasores de corriente [6]–[9]. Además se tiene que en el aspecto económico-administrativo, los sistemas de transmisión tienen algunas limitaciones que deben ser abordadas con el fin de garantizar el

control para mantener el nivel de seguridad de un sistema de potencia al tiempo que maximiza la eficiencia del mercado. El inconveniente más evidente de las restricciones en transmisión es un problema de congestión que se convierte en un obstáculo para la competencia perfecta entre los participantes en el mercado, ya que puede influir en los precios del mercado spot [10], [11].

Las formas de onda de tensiones y corrientes en sistemas eléctricos de potencia pueden incluir armónicos más altos, componentes transitorias y ruido aleatorio debido a fallas y otras perturbaciones. Para los dispositivos de control y protección, es necesario estimar los parámetros en tiempo real de las formas de onda básicas [12]. Para tener una estimación precisa de localización de fallas, son seleccionadas las características útiles y eficientes entre las características candidatas utilizando el algoritmo de Prony [13]. Es necesario analizar el comportamiento transitorio de un sistema con un grupo de auto-generadores, subestaciones y motores de inducción. Las oscilaciones de potencia y el rendimiento de recuperación de la tensión después de algunas contingencias se reconocen como problemas típicos en el sistema del cliente [14]. En la figura 1, se puede observar un sistema de 5 barras incorporados con dos PMU, los cuales se encargan de enviar datos de mediciones sincronizadas de voltaje y corriente a través de un sistema GPS, para que en el centro de control se proceda a analizarlos con Prony. El método Prony en el SEP encuentra raíces para detectar el período de oscilación y si está en normal así como detecta valores de sobrevoltaje o sobrecorriente y mandar una señal de alerta para la toma de decisiones en el centro de control.

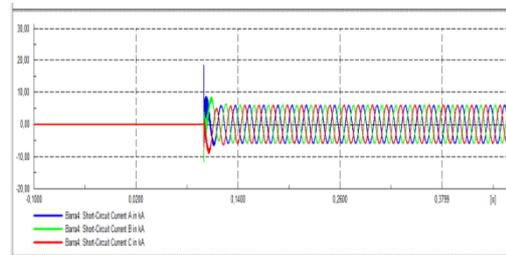


**Figura 1.** Diagnóstico de Fallas en un SEP de transmisión mediante Prony.

Este artículo presenta un análisis acerca: del diagnóstico de fallas y la estabilidad de frecuencia como introducción. Luego, en la sección 2 se analiza un algoritmo de predicción o diagnóstico de fallas en sistemas de transmisión mediante Prony, así como sus ecuaciones de modelado matemático. En la sección 3 se formula el problema mediante Prony. En la sección 4 se presentan algunas simulaciones. En la sección 5 se establecen las conclusiones y finalmente se presentan las referencias.

## 2. Algoritmo de Prony aplicado a líneas de transmisión

El algoritmo de Prony es un proceso de combinación lineal de funciones exponenciales complejas es decir cuando se disponen de datos de muestras igualmente espaciales que corresponden a un proceso de superposición de dos o más armónicos con períodos desconocidos [15], [16]. Este método pretende ajustar una curva de  $p$  términos exponenciales (cada término tiene 2 parámetros; una amplitud  $A_i$  y un exponente  $\gamma_i$  donde  $(A_i \exp(\gamma_i t))$  para  $2p$  datos medidos [17].

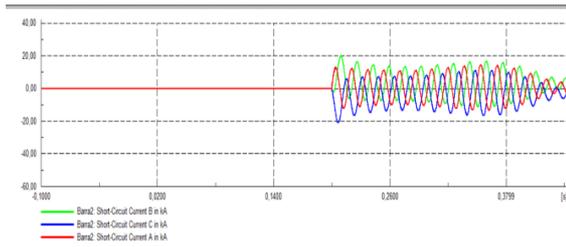


**Figura 2.** Corrientes de fase del sistema de 4 Barras IEEE simuladas en DIGSILENT.

La figura 2 muestra una simulación de las corrientes de fase en el sistema IEEE de 4 barras cuando ocurre una falla en una de ellas. El tiempo de simulación es de 0.4 segundos, lo cual permitirá efectuar un análisis de estabilidad transitoria.

Las líneas de transporte del sistema eléctrico de potencia están sujetas a fallas por ello es necesario registrarlas, detectarlas, predecirlas y analizarlas, para obtener un sistema más robusto y más confiable. En los momentos de contingencias o perturbaciones, es vital identificar los parámetros de líneas asimétricas, así como determinar un método de localización de la falla teniendo en cuenta la transposición de líneas [18]–[20]. Todos los métodos requieren un preprocesamiento de datos, una representación adecuada de la

muestra y una segmentación de los registros de la falla [21], [22].



**Figura 3.** Corrientes de fase del sistema de 4 Barras IEEE simuladas en DIGSILENT.

En la figura 3 se presenta una simulación de las corrientes de fase cuando ocurre una falla en una de las barras del sistema IEEE de 14 barras en el programa DIGSILENT, de igual manera útil para diagnóstico de fallas en el análisis de estabilidad transitoria.

Cada subestación de transmisión cuenta con relés de protección digitales, IED's o grabadoras de fallas [23], [24]. Una falla en la red ya sea un cortocircuito o una desconexión abrupta de un conductor, conduce a una grabación de las señales de voltaje y de corriente en una determinada región alrededor de una línea fallada. Estos registros de fallas se recogen y archivan por los operadores del sistema de transmisión, pero muchas veces permanecen sin procesar [25]. Un análisis detallado de los registro de fallas sólo se realiza después de accidentes que implican daños personales o reconexiones automáticas sin éxito [26]–[28]. En los últimos años las capacidades de los registros de fallas se han reconocido lo que motivó el desarrollo de varios algoritmos [29]. El objetivo de este trabajo es llegar a describir un modelo matemático que permita detectar o predecir una falla para minimizar pérdidas en las líneas del sistema de transmisión eléctrica [30]–[32].

### 3. Formulación del Problema mediante el método de Prony

El análisis de Prony es un método que permite ajustar un modelo lineal. Se prefiere este análisis frente al de Fourier, pese a su similitud, Prony es más completo ya que permite analizar no solamente los armónicos, sino también interarmónicos, en donde los intervalos periodicidad son variables y muy largos. Se basa en una combinación lineal de términos exponenciales, aplicada a un número finito de muestras de una señal espaciada equivalente en el tiempo. Este análisis tiene la ventaja de ser “ringdown” es decir, que es posible su aplicación, ya sea al resultado de una simulación o una medición de campo de la respuesta característica del sistema.

Además el método de Prony admite que el sistema sea de una sola salida en comparación con la realidad de los Sistemas Eléctricos de Potencia que son de salidas múltiples (muchas señales que oscilan con el mismo modo). La principal desventaja del método Prony es determinar qué estimaciones modales son más precisas, ya que el ruido es la principal restricción en la obtención de estimaciones de los modos. El análisis Prony se basa en un método polinomial que implica el proceso de encontrar las raíces de un polinomio característico. Extrae la información de una señal uniformemente muestreada y construye una serie de exponenciales sinusoidales o complejas.

Según [33], [34] se puede escribir las ecuaciones de señales eléctricas de análisis modal de Prony en notación matemática mediante ( 1):

$$y(t) = \sum_{i=1}^N A_i e^{\alpha_i t} \cos(\omega_i t + \theta_i) \quad (1)$$

$$= \sum_{i=1}^N A_m y_{i0} e^{\beta_i t}$$

$A_i$  : Componente de amplitud,  
 $\omega$  : Frecuencia de oscilación,  
 $\alpha$  : Amortiguamiento del  $i$ ésimo modo,  
 $\beta$  : Componente de fase del  $i$ ésimo modo,  
 $y(t)$  : Señal medida que corresponden a muestras ordenadas  $x(t)$ ,  
 $i$ : número de funciones exponenciales requeridos en el ajuste,  
 La función en tiempo discreto se expresa como sigue:

$$y[n] = \sum_{i=1}^N h_k z_k^{n-1} \quad (2)$$

Donde:  $h_k = A_k e^{j\psi_k}$ ;  $z_k = e^{(\alpha_k + j\omega_k)T_p}$   
 $h_k$ : Amplitud compleja,  
 $z_k$ : Exponencial compleja,  
 $N$ : Número de exponenciales complejas,  
 $\psi_k$ : Fase en radianes,  
 $T_p$ : Período de tiempo en segundos,  
 $\alpha_k$ : Factor de amortiguamiento en porcentaje,  
 $\omega_k$ : Frecuencia en Hz

El problema de la estimación se basa en la minimización de errores cuadráticos sobre los valores del número de exponenciales complejas  $N$ .

Según la ecuación ( 1) existen  $2M$  parámetros desconocidos:  $h_1, h_2, \dots, h_M, z_1, z_2, \dots, z_M$ . Las  $M$  ecuaciones de ( 2) se pueden expresar de forma matricial mediante:

$$\begin{bmatrix} z_1^0 & z_2^0 & \dots & z_M^0 \\ z_1^1 & z_2^1 & \dots & z_M^1 \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ z_1^{M-1} & z_2^{M-1} & \dots & z_M^{M-1} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} h_1 \\ h_2 \\ \vdots \\ h_M \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x[1] \\ x[2] \\ \vdots \\ x[M] \end{bmatrix} \quad (3)$$

La ecuación matricial ( 3) representa un conjunto lineal que puede ser resuelto por el vector desconocido de amplitudes.

Prony propone definir un polinomio donde los  $z_k$  exponentes son sus raíces como se muestra en ( 4) :

$$F(z) = \prod_{k=1}^M (z - z_k) = (z - z_1)(z - z_2) \dots (z - z_M) \quad (4)$$

Los coeficientes de amortiguamiento son parámetros que requieren ser determinados para describir el proceso oscilatorio en cada punto de medición. Los enfoques de hoy en día basados en el análisis de Prony extendido tratan de un ajuste, utilizando técnicas de estimación de mínimos cuadrados de un conjunto de  $N$  datos mediante un conjunto de  $n$  funciones exponenciales amortiguadas.

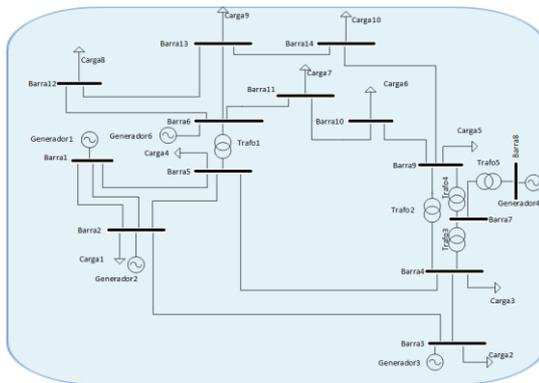
#### 4. Análisis de los Resultados

El análisis de Prony, es una herramienta útil en el análisis de oscilaciones, que facilitan el estudio de la estabilidad transitoria en el Sistema Eléctrico de Potencia. Es aplicado principalmente en la identificación del amortiguamiento modal, reconocimiento de funciones de transferencia, estimación de la efectividad de acciones de control y diseño de diagramas de control. Lo cual permite adquirir los parámetros de entrada de amortiguamiento, frecuencia, amplitud y fase de señal. Este análisis permite la predicción de fallas en el sistema de transmisión eléctrica, mediante la verificación para saber si la frecuencia, amplitud y fase de la señal operen dentro de los parámetros apropiados, además es muy eficiente ya que utiliza un parámetro de entrada para predecir el comportamiento dinámico de varios elementos de salida.

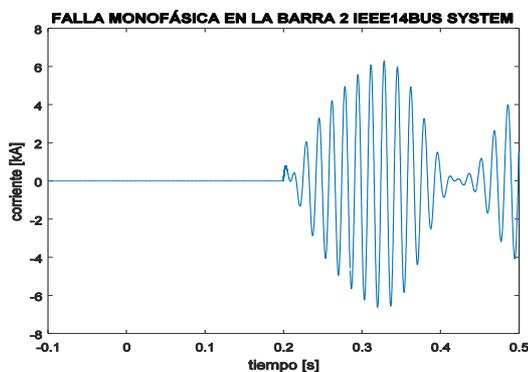
Podemos describirlo brevemente en 6 pasos:

Paso 1. Localizar los elementos seleccionados del registro en una matriz de datos.

- Paso 2. Acoplar los datos con un modelo de predicción lineal discreto.
- Paso 3. Hallar las raíces del polinomio y sus coeficientes de predicción.
- Paso 4. Con las raíces del Paso 3, adquirimos una segunda ecuación lineal
- Paso 5. Verificar que la calidad de la señal esté dentro de los rangos apropiados. Terminar. Caso contrario ir a Paso 6.
- Paso 6. Aumentar N y n y regresar al Paso 4.



**Figura 4.** Sistema Eléctrico de Potencia de 14 Barras de IEEE.



**Figura 5.** Corriente de fase basada en Prony del sistema de 14 Barras IEEE.

La figura 4 presenta el diagrama unifilar del SEP de 14 barras para efectos de simulación. En la figura 5 se aprecia el comportamiento de la corriente de fase de 14 barras de IEEE en caso de ocurrir una falla monofásica en la barra 2. Se procede a tomar la decisión para recuperar de forma eficiente la estabilidad del sistema eléctrico de transmisión.

## 5. Conclusiones

En este trabajo se formuló un nuevo modelo de diagnóstico de fallas en el sistema de transmisión eléctrica. El método presentado utiliza el análisis de Prony para resolver el problema de pérdidas técnicas y económicas debido a probables fallas en los sistemas de transmisión, obteniendo coeficientes de predicción a partir de las mediciones de un solo extremo de tensiones, corrientes ángulos, entre otras variables del SEP antes de la falla, se garantiza que los datos obtenidos provienen de programas fiables y eficientes. El método utiliza información pre-falla y durante la falla de los fasores de tensión y corriente. Los resultados de la evaluación en el sistema de la muestra han puesto de manifiesto que a pesar de las variaciones simultáneas de los parámetros, así como la presentación de los patrones de prueba que no se veían en el conjunto de la formación, el método presenta una alta eficiencia y precisión. De esta manera, se puede concluir que es robusto y muy adecuado para la localización, diagnóstico o predicción de fallas en los SEP de transmisión.

El programa de análisis desarrollado en MatLab, que se basa en el análisis de Prony, evidencia ser sumamente útil para detectar la existencia de componentes subsíncronas en la corriente eléctrica, además permite la medición en tiempo real de las componentes transitorias de la corriente.

## Referencias

- [1] T. Akbari and M. Tavakoli Bina, "A linearized formulation of AC multi-year transmission expansion planning: A mixed-integer linear programming approach," *Electr. Power Syst. Res.*, vol. 114, pp. 93–100, Sep.

- 2014.
- [2] A. P. Alves da Silva, A. C. S. Lima, and S. M. Souza, "Fault location on transmission lines using complex-domain neural networks," *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 43, no. 1, pp. 720–727, Dec. 2012.
- [3] M. Bachtiar Nappu, A. Arief, and R. C. Bansal, "Transmission management for congested power system: A review of concepts, technical challenges and development of a new methodology," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 38, pp. 572–580, Oct. 2014.
- [4] S. Bhattacharya, "Fault detection on a ring-main type power system network using artificial neural network and wavelet entropy method," pp. 1032–1037, 2015.
- [5] M. Farshad and J. Sadeh, "Transmission line fault location using hybrid wavelet-Prony method and relief algorithm," *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 61, pp. 127–136, Oct. 2014.
- [6] Z. Jiang, S. Miao, H. Xu, P. Liu, and B. Zhang, "An effective fault location technique for transmission grids using phasor measurement units," *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 42, no. 1, pp. 653–660, Nov. 2012.
- [7] Z. He, S. Lin, Y. Deng, X. Li, and Q. Qian, "A rough membership neural network approach for fault classification in transmission lines," *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 61, pp. 429–439, Oct. 2014.
- [8] S. K. Jain and S. N. Singh, "Harmonics estimation in emerging power system: Key issues and challenges," *Electr. Power Syst. Res.*, vol. 81, no. 9, pp. 1754–1766, Sep. 2011.
- [9] M. Jamil, A. Kalam, A. Q. Ansari, and M. Rizwan, "Wavelet-FFNN Based Fault Location Estimation of a Transmission Line," vol. 1, no. July, pp. 77–82, 2013.
- [10] J. Ma, J. Li, J. S. Thorp, L. Fellow, A. J. Arana, Q. Yang, and A. G. Phadke, "A Fault Steady State Component-Based Wide Area Backup Protection Algorithm," vol. 2, no. 3, pp. 468–475, 2011.
- [11] B. Mohammadi-Ivatloo, M. Shiroei, and M. Parniani, "Online small signal stability analysis of multi-machine systems based on synchronized phasor measurements," *Electr. Power Syst. Res.*, vol. 81, no. 10, pp. 1887–1896, Oct. 2011.
- [12] T. Lobos, P. Kosty, J. Pospieszna, and M. Jaroszewski, "Location of Faults on Transmission Lines Using Wavelet Transforms," pp. 633–636, 2008.
- [13] L. V. Nevada, "Fault Location Estimation on Transmission

Lines Using Wavelet Transform and Artificial Neural Network,” pp. 5–8, 2006.

- [14] P. E. Co and I. E. Co, “Transient Stability Assessment of Industrial Power Systems with Detailed Models Implementation Masayuki Watanabe\*, Yasunori Mitani\*, Hiroyuki Yoshihisa Uriu+ and Yasuhiro Urano§,” pp. 1–6, 2011.
- [15] H. Mori and S. Tsuzuki, “A fast method for topological observability analysis using a minimum spanning tree technique,” *Power Syst. IEEE Trans.*, vol. 6, no. 2, pp. 491–500, 1991.
- [16] A. H. Osman, A. Noureldin, A. El-Shafie, and D. R. McGaughey, “Fast orthogonal search approach for distance protection of transmission lines,” *Electr. Power Syst. Res.*, vol. 80, no. 2, pp. 215–221, Feb. 2010.
- [17] S. M. Nobakhti and M. Akhbari, “A new algorithm for fault location in series compensated transmission lines with TCSC,” *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 57, pp. 79–89, May 2014.
- [18] R. Schulze and P. Schegner, “A survey on modern fault record analysis,” *2012 IEEE Power Energy Soc. Gen. Meet.*, pp. 1–8, 2012.
- [19] “Reliability improvement on distributions power systems by means of primary feeder reconfiguration,” no. 38, pp. 59–64, 2008.
- [20] G. B. Zou and H. L. Gao, “Extra high speed hybrid protection scheme for high voltage transmission line,” *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 63, pp. 83–90, Dec. 2014.
- [21] J. Zhu, D. Xie, F. Wang, and T. Cao, “Study on the Harmonics of Switching Power Supply,” *Procedia Eng.*, vol. 29, pp. 2098–2102, Jan. 2012.
- [22] H. L. Zhu, Y. X. Duan, X. P. Zhang, H. Qi, and C. X. Huang, “Hybrid of MST and genetic algorithm on minimizing PMU placement,” *Proc. 2013 3rd Int. Conf. Intell. Syst. Des. Eng. Appl. ISDEA 2013*, no. 2, pp. 820–823, 2013.
- [23] T. Zhou, Y. Tang, and G. Chen, “Analysis of global behaviors in a classical power system,” *Math. Comput. Model.*, vol. 40, no. 9–10, pp. 1025–1045, Nov. 2004.
- [24] Z. Yu, Q. Li, R. Zeng, J. He, Y. Zhang, Z. Li, C. Zhuang, and Y. Liao, “Calculation of surface electric field on UHV transmission lines under lightning stroke,” *Electr. Power Syst. Res.*, vol. 94, pp. 79–85, Jan. 2013.
- [25] G. Song, X. Chu, X. Cai, S. Gao, and M. Ran, “A fault-location method for VSC-

- HVDC transmission lines based on natural frequency of current,” *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 63, pp. 347–352, Dec. 2014.
- [26] G. Sivanagaraju, S. Chakrabarti, S. Member, and S. C. Srivastava, “Uncertainty in Transmission Line Parameters: Estimation and Impact on Line Current Differential Protection,” vol. 63, no. 6, pp. 1496–1504, 2014.
- [27] T. H. Sikiru, A. A. Jimoh, Y. Hamam, Y. Alayli, and J. T. Agee, “Transmission dispatch for loss minimisation using linearised power flow equations in mixed integer programming,” *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 62, pp. 855–861, Nov. 2014.
- [28] S. Saha and M. Aldeen, “Generalised scalable fault dependent time invariant state space model for large interconnected power systems,” *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 60, pp. 165–181, Sep. 2014.
- [29] A. St. Leger, A. Deese, J. Yakaski, and C. Nwankpa, “Controllable analog emulator for power system analysis,” *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 33, no. 10, pp. 1675–1685, Dec. 2011.
- [30] J. Upendar, C. P. G. M. Ieee, and G. K. Singh, “Discrete Wavelet Transform and Probabilistic Neural Network based Algorithm for Classification of Fault on Transmission Systems.”
- [31] A. Vahidnia, G. Ledwich, E. Palmer, and A. Ghosh, “Dynamic equivalent state estimation for multi-area power systems with synchronized phasor measurement units,” *Electr. Power Syst. Res.*, vol. 96, pp. 170–176, Mar. 2013.
- [32] B. Vyas, B. Das, and R. P. Maheshwari, “An improved scheme for identifying fault zone in a series compensated transmission line using undecimated wavelet transform and Chebyshev Neural Network,” *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 63, pp. 760–768, Dec. 2014.
- [33] T. Lobos, J. Reziner, and P. Schegner, “Parameter estimation of distorted signals using prony method,” *2003 IEEE Bol. Power Tech Conf. Proceedings*, vol. 4, no. 1, pp. 692–696, 2003.
- [34] T. Lobos, “Spectral Stimulation of Disturbed Signals Using Prony Method.” 2004.