

Identificación de Parámetros Erróneos en Sistemas Eléctricos de Potencia y Corrección en base a Mediciones Sincrofasoriales

M.L. Farinango¹ S. Grijalva² J. Játiva¹

¹ Escuela Politécnica Nacional, EPN

E-mail: lfarinango@cenace-org.ec, jesus.jativa@epn.edu.ec

² Georgia Institute of Technology, Atlanta, GA, USA

E-mail: sgrijalva@ece.gatech.edu

Resumen

Los algoritmos convencionales de estimación de estado de sistemas de potencia se basan en la suposición de que los parámetros tales como la resistencia y reactancia de las líneas de transmisión, los taps de transformadores y el estado de los interruptores no tienen errores. En la realidad, estos parámetros no se conocen con certeza. Los errores en las impedancias de las ramas son menos visibles que los errores en los estados de los interruptores y pueden producir errores en los resultados del estimador que pueden pasar inadvertidos por largo tiempo. Los errores en los parámetros pueden producir un impacto sobre la estimación de estado similar o superior al de los errores no detectados en las mediciones. En este documento se desarrolla un programa de identificación de errores en los parámetros basado en un algoritmo que utiliza Multiplicadores de Lagrange. Este algoritmo se aplica a casos de estudio en diferentes condiciones de demanda obtenidos de los sistemas de tiempo real EMS y fuera de línea. Una vez identificado el equipo de red que presenta errores de parámetros, se plantean alternativas de cálculo para la corrección de parámetros, utilizando mediciones de equipos de medición fasorial PMUs.

Palabras clave— Estimación de Estado, Parámetros de SEP, PMU, Multiplicadores de Lagrange.

Abstract

Conventional state estimation algorithms are based on the assumption that the parameters of the lines and transformers (resistance, reactance, transformers taps, etc.) and the state of the switching devices do not have errors. In reality, these parameters are not known with certainty. Errors in the branch impedance are less visible compared to switching status errors, and they may result in errors and biases in the state estimation results that persist for long periods of time. Errors in the system parameters can have an effect on estimation similar to those produced by errors in measurements. This paper describes a method to identify parameter errors using a Lagrange multiplier algorithm. This algorithm is applied to case studies in different conditions of demand obtained from real-time systems EMS and offline models. After identifying the network equipment that has parameter errors, alternatives are explored to correct the parameters using synchronized phasor measurement units (PMUs).

Index Terms— State Estimation, power system parameters, PMU, Lagrange Multipliers.

Recibido: 09-09-2016, Aprobado tras revisión: 09-12-2016

Forma sugerida de citación: Farinango, L.; Grijalva, S.; Játiva S. (2017). "Localización de Fallas Mediante la Transformada Wavelet en Líneas de Transmisión". Revista Técnica "energía". No. 13, Pp. 158-168
ISSN 1390-5074.

1. INTRODUCCIÓN

El estimador de estado es una función crítica del sistema de manejo de energía EMS, el cual considera que la topología y parámetros de la red eléctrica son conocidos, y en base a una función de optimización, valida las mediciones de campo y permite obtener una representación de tiempo real del sistema más confiable. Los resultados del estimador de estado son imprescindibles para el correcto funcionamiento de todas las actividades involucradas en el control y operación del sistema eléctrico [1], incluyendo el funcionamiento de las aplicaciones de seguridad de la red.

Los algoritmos de estimación de estado convencionales se basan en la suposición de que los parámetros de las líneas (resistencia, reactancia, tomas de los transformadores, etc.) y el estado de los interruptores no tienen errores, lo cual no necesariamente es cierto [2].

Los errores en los parámetros pueden incluir [3]:

- Impedancias incorrectas de ramas
- Impedancias incorrectas de transformadores o posición incorrecta de taps.

Estos errores pueden deberse a [3]:

- Datos erróneos proporcionados por el fabricante
- Errores en la calibración de las mediciones
- Diferencias entre la longitud real de las líneas y la de diseño
- Cambio de los taps de transformadores por parte de personal de campo registrados incorrectamente en el sistema de manejo de energía
- Errores humanos en el ingreso de datos

Estos errores pueden producir:

- Soluciones erróneas del estimador de estado y por lo tanto resultados incorrectos de los programas que utilizan como entradas los datos de salida del estimador, como por ejemplo, los programas de análisis de seguridad de red
- Resultados incorrectos en la detección de mediciones erróneas

Los errores en los parámetros pueden producir un impacto sobre la estimación de estado similar o superior al de los errores en las mediciones no detectados [2].

A. Estimador de Estado Convencional

Un estimador de estado SE incluye las funciones [1] ilustradas en la Fig. 1.

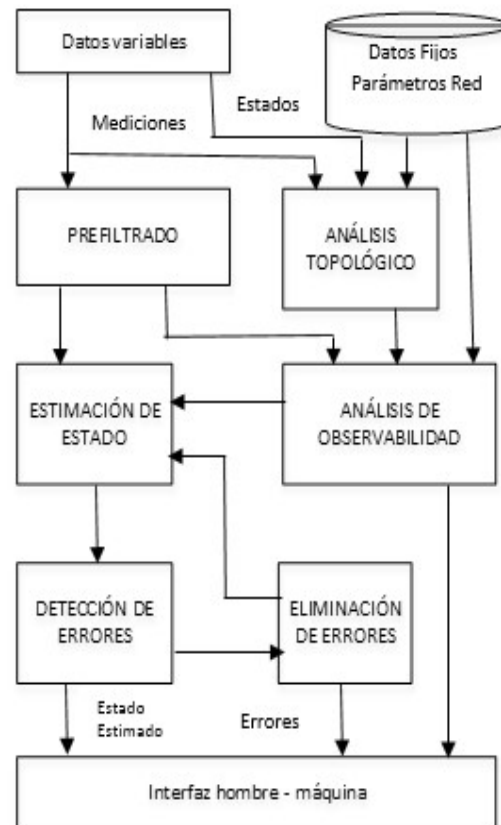


Figura:1 Componentes y sus relaciones de un SE [1]

B. Formulación Matemática del Estimador de Estado de Mínimos Cuadrados Ponderados WLS

Sea \mathbf{z} el vector de mediciones, \mathbf{x} el vector de variables de estado (magnitudes y ángulos de los voltajes en los nodos), \mathbf{h} las ecuaciones que relacionan las mediciones con las variables de estado y \mathbf{e} el vector de errores de las mediciones. Entonces, el vector de mediciones se modela como [2]:

$$\mathbf{z} = \mathbf{h}(\mathbf{x}) + \mathbf{e} \quad (1)$$

Sea \mathbf{R} la matriz de covarianzas de errores y la matriz de ponderaciones de las mediciones[2]:

$$\mathbf{R} = \mathbf{E}[\mathbf{e} \cdot \mathbf{e}^T] = \text{diag}([\sigma_1^2 \ \sigma_2^2 \ \dots \ \sigma_m^2]) \quad (2)$$

$$\mathbf{W} = \mathbf{R}^{-1}$$

En la ecuación (1), \mathbf{x} es el verdadero valor del estado desconocido y como los errores \mathbf{e} son variables aleatorias, las mediciones \mathbf{z} también lo son, \mathbf{z} tiene distribución gaussiana con media $\mathbf{h}(\mathbf{x})$ y covarianza

R. La función de densidad de probabilidad de \mathbf{z} se puede escribir [2]:

$$f(\mathbf{z}) = (\sqrt{2\pi})^{-m} |\mathbf{W}|^{1/2} e^{-\frac{1}{2}[\mathbf{z}-\mathbf{h}(\mathbf{x})]^T \mathbf{W} [\mathbf{z}-\mathbf{h}(\mathbf{x})]} \quad (3)$$

En el problema de estimación de estado se recibe un conjunto de mediciones \mathbf{z} basándose en el hecho de estimar el estado \mathbf{x} . El conjunto \mathbf{x} que maximiza la función de densidad de probabilidad (3) es el estimado de máxima verosimilitud $\hat{\mathbf{x}}$.

Maximizar $f(\mathbf{z})$ en (3) es equivalente a minimizar el término cuadrático del exponente [2]:

$$\mathbf{J}(\mathbf{x}) = [\mathbf{z} - \mathbf{h}(\mathbf{x})]^T \mathbf{W} [\mathbf{z} - \mathbf{h}(\mathbf{x})] \quad (4)$$

$$\mathbf{J}(\mathbf{x}) = \sum_{i=1}^m \frac{[z_i - h_i(\mathbf{x})]^2}{\sigma_i^2} \quad (5)$$

Siendo $\mathbf{J}(\mathbf{x})$ la función objetivo de mínimos cuadrados ponderados.

Como en este caso, el estimador de máxima verosimilitud minimiza el error cuadrático ponderado con la exactitud de las mediciones, éste se conoce como el estimador de mínimos cuadrados ponderados (WLS) [2].

C. Tipos de Errores de Parámetros en Sistemas Eléctricos de Potencia

Según los análisis realizados por Pedro Zarco y Antonio Gómez Expósito en [2] y [3], respecto a los errores en la conductancia o en la susceptancia, se demuestra que la susceptancia tiene una importancia mucho mayor. Así, se menciona que es razonable asumir que en la práctica no existe error en la conductancia, ya que las pequeñas conductancias en paralelo que suelen tener las líneas, no afectan significativamente la estimación de estado [3].

Los errores de parámetros de red influyen más sobre las mediciones de flujo de las líneas comparado con las inyecciones en los nodos y presentan un carácter local; es decir, influyen más en los equipos que se encuentren a menor distancia eléctrica [3].

Los errores en los taps de transformadores son menos visibles que los errores en parámetros de red y pueden mantenerse por largos períodos de tiempo sin ser detectados, por lo que su impacto puede ser mayor [1].

D. Métodos de Estimación de Parámetros

En [1], [3], [7], [8] se propone la siguiente clasificación general:

- Métodos que no amplían el vector de estado: Se basan principalmente en análisis de sensibilidad residual.
- Métodos que amplían el vector de estado: Los parámetros sospechosos son incluidos en el vector de estado, de manera que los parámetros y el estado son estimados simultáneamente [4].
- Métodos basados en mediciones históricas: En este método, el vector de estado se aumenta con los parámetros sospechosos y se procesan varias muestras de diferentes momentos para aumentar la redundancia alrededor de los parámetros erróneos.

E. Comparación entre Métodos

Los métodos presentados para identificación de parámetros erróneos tienen dos grandes limitaciones que son [4]:

- Se requiere identificar un set de parámetros sospechoso antes de realizar la estimación de errores de parámetros.
- Los datos erróneos de mediciones deben ser removidos antes de la identificación de parámetros erróneos.

Sin la primera condición los métodos de vector de estado aumentado no pueden ser procesados y los métodos que no amplían el vector de estado y se basan principalmente en análisis de sensibilidad residual tienen limitaciones en el cálculo para sistemas grandes. Con errores de mediciones presentes en el sistema, los métodos planteados anteriormente no ofrecen una solución correcta [4].

F. Identificación de Parámetros Erróneos con Multiplicadores de Lagrange

A fin de evitar las desventajas que ofrecen los métodos convencionales de identificación de parámetros erróneos, Jun Zhu y Ali Abur proponen en [4] un método de identificación de errores de parámetros que se basa en multiplicadores de Lagrange de las restricciones de los parámetros.

Después de la solución de estimación de estado tradicional, los residuales de medición se utilizan para calcular los multiplicadores de Lagrange asociados con los errores de los parámetros. Si estos multiplicadores tienen un valor significativo mayor a tres, entonces el parámetro asociado será probablemente erróneo [4], debido a la relación

directa que existe entre los multiplicadores de Lagrange y los errores de parámetros.

La principal ventaja de este método es que se pueden calcular los residuales normalizados de las mediciones y los multiplicadores de Lagrange de los errores de parámetros, permitiendo su identificación, incluso cuando se presentan simultáneamente. La primera parte del procedimiento propuesto en [4] se basa sólo en los mínimos cuadrados ponderados convencionales de solución de estimación de estado (WLS) [2]; sin embargo, los procedimientos de identificación y corrección de errores posteriores tendrán que ser integrados en el código del estimador de estado convencional o implementado en una aplicación adicional. No hay necesidad de especificar un conjunto de parámetros sospechosos a priori, ya que el método propuesto identificará fácilmente los parámetros erróneos junto con cualquier set de mediciones erróneas existentes [4].

Una vez que se han detectado los parámetros erróneos en base al algoritmo basado en multiplicadores de Lagrange, se realiza la corrección de los parámetros erróneos calculando los mismos con mediciones obtenidas de los PMUs, como un procedimiento fuera de línea.

Utilizando MATLAB se desarrolla un programa de identificación de parámetros erróneos utilizando el algoritmo basado en los Multiplicadores de Lagrange para la identificación de parámetros erróneos en el S.N.I. en diferentes escenarios de demanda y se aplican a los siguientes modelos:

- Sistemas de tiempo real EMS
- Sistema fuera de línea Power Factory de DIGSILENT.

Una vez que se identifican los parámetros erróneos, se aplican los procedimientos de cálculo de parámetros utilizando la información disponible de los PMUs instalados en el S.N.I..

Como ejemplo de aplicación se utiliza la línea Molino Pascuales, la cual obtuvo un valor alto de Multiplicador de Lagrange y dispone de PMUs instalados en los dos extremos.

En general, se observa que con el programa de identificación de parámetros erróneos es posible obtener una lista de prioridad para revisar los parámetros de los equipos; tanto en el sistema EMS como en el sistema PowerFactory de DIGSILENT y si existen las mediciones de PMUs disponibles, se pueden aplicar los programas de corrección de los parámetros correspondientes.

G. Presentación del Artículo

Este artículo está organizado de la siguiente manera:

- Introducción
- Identificación de Parámetros Erróneos por el Método de Multiplicadores de Lagrange
- Corrección de Parámetros Erróneos con PMUs
- Programa de Estimación de Parámetros
- Resultado de Aplicación del Programa al S.N.I
- Conclusiones
- Referencias

2. IDENTIFICACIÓN DE PARÁMETROS ERRÓNEOS POR EL MÉTODO DE MULTIPLICADORES DE LAGRANGE

A. Formulación Matemática del Método de Multiplicadores de Lagrange [4]

Sea \mathbf{z} el vector de mediciones, \mathbf{x} el vector de variables de estado, \mathbf{p}_e el vector de errores de parámetros de red y \mathbf{e} el vector de error de mediciones. Los valores de las mediciones se relacionan con las variables del sistema de acuerdo a la ecuación:

$$\mathbf{z} = \mathbf{h}(\mathbf{x}, \mathbf{p}_e) + \mathbf{e} \quad (6)$$

Las barras sin generación o carga proveen mediciones exactas; por ejemplo, inyecciones de potencia iguales a cero, con la siguiente restricción de igualdad [5].

$$c(\mathbf{x}, \mathbf{p}_e) = 0 \quad (7)$$

El vector de parámetros de red será [5]:

$$\mathbf{p} = \mathbf{p}_t + \mathbf{p}_e \quad (8)$$

Donde $\mathbf{p} = \mathbf{p}_t + \mathbf{p}_e$ son los vectores de parámetros de red asumido y verdadero. El estimador de estado asume normalmente los errores de parámetros de red como cero. Por lo tanto sin error se puede plantear la siguiente restricción [5]:

$$\mathbf{p}_e = 0 \quad (9)$$

El problema de estimación de estado con WLS en presencia de errores de parámetros de red y restricciones de igualdad puede ser formulado como un problema de optimización [5]:

Minimizar

$$J(\mathbf{x}) = \frac{1}{2} \mathbf{r}^t \mathbf{W} \mathbf{r} \quad (10)$$

Sujeto a:

$$\mathbf{c}(\mathbf{x}, \mathbf{p}_e) = 0 \quad (11)$$

$$\mathbf{p}_e = 0 \quad (12)$$

Siendo el vector de residuales de mediciones:

$$\mathbf{r} = \mathbf{z} - \mathbf{h}(\mathbf{x}, \mathbf{p}_e) \quad (13)$$

\mathbf{W} es la matriz diagonal cuya inversa es la matriz de covarianza de errores de mediciones $\text{cov}(\mathbf{e})$.

Aplicando el método de Multiplicadores de Lagrange, se puede definir el siguiente Lagrangiano:

$$\mathbf{L} = \frac{1}{2} \mathbf{r}^t \mathbf{W} \mathbf{r} - \mathbf{u}^t \mathbf{c}(\mathbf{x}, \mathbf{p}_e) - \boldsymbol{\lambda}^t \mathbf{p}_e \quad (14)$$

Reemplazando (13) en (14)

$$\mathbf{L} = \frac{1}{2} (\mathbf{z} - \mathbf{h}(\mathbf{x}, \mathbf{p}_e))^t \mathbf{W} (\mathbf{z} - \mathbf{h}(\mathbf{x}, \mathbf{p}_e)) - \mathbf{u}^t \mathbf{c}(\mathbf{x}, \mathbf{p}_e) - \boldsymbol{\lambda}^t \mathbf{p}_e \quad (15)$$

Aplicando condiciones de optimalidad de primer orden [5], se obtiene lo siguiente:

Para \mathbf{x} :

$$\frac{\partial \mathbf{L}}{\partial \mathbf{x}} = \left[\frac{\partial \mathbf{h}(\mathbf{x}, \mathbf{p}_e)}{\partial \mathbf{x}} \right]^t \mathbf{W} \mathbf{r} + \left[\frac{\partial \mathbf{c}(\mathbf{x}, \mathbf{p}_e)}{\partial \mathbf{x}} \right]^t \mathbf{u} = 0 \quad (16)$$

Siendo:

$$\mathbf{H}_x = \frac{\partial \mathbf{h}(\mathbf{x}, \mathbf{p}_e)}{\partial \mathbf{x}} \quad (17)$$

$$\mathbf{C}_x = \frac{\partial \mathbf{c}(\mathbf{x}, \mathbf{p}_e)}{\partial \mathbf{x}} \quad (18)$$

Reemplazando (17) y (18) en (16) se tiene

$$\frac{\partial \mathbf{L}}{\partial \mathbf{x}} = \mathbf{H}_x^t \mathbf{W} \mathbf{r} + \mathbf{C}_x^t \mathbf{u} = 0 \quad (19)$$

Para \mathbf{p} :

$$\frac{\partial \mathbf{L}}{\partial \mathbf{p}} = \left[\frac{\partial \mathbf{h}(\mathbf{x}, \mathbf{p}_e)}{\partial \mathbf{p}_e} \right]^t \mathbf{W} \mathbf{r} + \left[\frac{\partial \mathbf{c}(\mathbf{x}, \mathbf{p}_e)}{\partial \mathbf{p}_e} \right]^t \mathbf{u} + \boldsymbol{\lambda} = 0 \quad (20)$$

Siendo:

$$\mathbf{H}_p = \frac{\partial \mathbf{h}(\mathbf{x}, \mathbf{p}_e)}{\partial \mathbf{p}_e} \quad (21)$$

$$\mathbf{C}_p = \frac{\partial \mathbf{c}(\mathbf{x}, \mathbf{p}_e)}{\partial \mathbf{p}_e} \quad (22)$$

Se tiene:

$$\frac{\partial \mathbf{L}}{\partial \mathbf{p}} = \mathbf{H}_p^t \mathbf{W} \mathbf{r} + \mathbf{C}_p^t \mathbf{u} + \boldsymbol{\lambda} = 0 \quad (23)$$

Para \mathbf{u} :

$$\frac{\partial \mathbf{L}}{\partial \mathbf{u}} = \mathbf{c}(\mathbf{x}, \mathbf{p}_e) = 0 \quad (24)$$

Para $\boldsymbol{\lambda}$:

$$\frac{\partial \mathbf{L}}{\partial \boldsymbol{\lambda}} = \mathbf{p}_e = 0 \quad (25)$$

\mathbf{u} y $\boldsymbol{\lambda}$ son los multiplicadores de Lagrange para las restricciones de igualdad (7) y (9). [5]

De la ecuación (23):

$$\boldsymbol{\lambda} = -\mathbf{H}_p^t \mathbf{W} \mathbf{r} - \mathbf{C}_p^t \mathbf{u} \quad (26)$$

Siendo la matriz de sensibilidad de parámetros \mathbf{S} :

$$\mathbf{s} = - \begin{bmatrix} \mathbf{W} \mathbf{H}_p \\ \mathbf{C}_p \end{bmatrix}^t \quad (27)$$

Por lo que $\boldsymbol{\lambda}$ puede expresarse en términos de \mathbf{u} , \mathbf{r} y \mathbf{S} como:

$$\boldsymbol{\lambda} = \mathbf{s} \begin{bmatrix} \mathbf{r} \\ \mathbf{u} \end{bmatrix} \quad (28)$$

Las restricciones de igualdad (9) permiten sustituir \mathbf{p}_e en (16) y (24). [5].

Cambiando la notación de $\mathbf{h}(\mathbf{x}, 0)$ y $\mathbf{c}(\mathbf{x}, 0)$ por $\mathbf{h}_0(\mathbf{x})$ y $\mathbf{c}_0(\mathbf{x})$, las ecuaciones de medición toman la siguiente forma:

$$\mathbf{z} = \mathbf{h}_0(\mathbf{x}) + \mathbf{e} \quad (29)$$

$$\mathbf{c}_0(\mathbf{x}) = 0 \quad (30)$$

Las ecuaciones (29) y (30) son las ecuaciones de mediciones convencionales e inyecciones cero usadas por los estimadores de estado [6]. Estas ecuaciones no incluyen errores de parámetros como variables explícitas.

Sustituyendo las aproximaciones de Taylor de primer orden para $\mathbf{h}(\mathbf{x},0)$ y $\mathbf{c}(\mathbf{x},0)$ en las ecuaciones (13) y (7) se obtiene las siguientes ecuaciones lineales [5]:

$$\mathbf{H}_x \cdot \Delta \mathbf{x} + \mathbf{r} = \Delta \mathbf{z} \quad (31)$$

$$\mathbf{C}_x \cdot \Delta \mathbf{x} = -\mathbf{c}_0(\mathbf{x}_0) \quad (32)$$

Donde $\Delta \mathbf{x} = \mathbf{x} - \mathbf{x}_0$, \mathbf{x}_0 son los valores iniciales para el vector de estado:

$$\Delta \mathbf{z} = \mathbf{z} - \mathbf{h}_0(\mathbf{x}_0)$$

En base a las ecuaciones (19), (31) y (32) se puede escribir la ecuación (33) en forma de matrices:

$$\begin{bmatrix} 0 & \mathbf{H}_x^t \mathbf{w} & \mathbf{C}_x^t \\ \mathbf{H}_x & \mathbf{I} & 0 \\ \mathbf{C}_x & 0 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \Delta \mathbf{x} \\ \mathbf{r} \\ \mathbf{u} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ \Delta \mathbf{z} \\ -\mathbf{c}_0(\mathbf{x}_0) \end{bmatrix} \quad (33)$$

Esta ecuación es la que se usa en la solución iterativa del problema convencional WLS [5]. La solución para las mediciones residuales \mathbf{r} y los multiplicadores de Lagrange para las inyecciones cero \mathbf{u} pueden ser obtenidas primero por la solución iterativa de (33). Una vez que la solución de estimador de estado tradicional converge; con la ecuación (28) se pueden calcular los multiplicadores de Lagrange del vector λ asociados a los errores de parámetros [5].

A fin de interpretar y comparar el significado del valor de un multiplicador de Lagrange λ_i este debe ser normalizado, para ello se utilizará la matriz de covarianzas $\text{cov}(\lambda)$.

Sea:

$$\mathbf{U} = [\mathbf{r} \quad \mathbf{u}]^T = \begin{bmatrix} \mathbf{r} \\ \mathbf{u} \end{bmatrix} \quad (34)$$

Y usando (36):

$$\Lambda = \text{cov}(\lambda) = \mathbf{S} \cdot \text{cov}(\mathbf{U}) \cdot \mathbf{S}^t \quad (35)$$

La covarianza de \mathbf{U} , $\text{cov}(\mathbf{U})$ puede ser calculada expresando \mathbf{r} y \mathbf{u} en términos del umbral de convergencia (mismatch) de mediciones [5]. Para esto invirtiendo la matriz de la ecuación (33) se obtienen los siguientes coeficientes:

$$\begin{bmatrix} 0 & \mathbf{H}_x^t \mathbf{w} & \mathbf{C}_x^t \\ \mathbf{H}_x & \mathbf{I} & 0 \\ \mathbf{C}_x & 0 & 0 \end{bmatrix}^{-1} = \begin{bmatrix} \mathbf{E}_1 & \mathbf{E}_2 & \mathbf{E}_3 \\ \mathbf{E}_4 & \mathbf{E}_5 & \mathbf{E}_6 \\ \mathbf{E}_7 & \mathbf{E}_8 & \mathbf{E}_9 \end{bmatrix} \quad (36)$$

Nótese que $\mathbf{c}_0(\mathbf{x}) = 0$ en la solución (33) permite plantear lo siguiente para \mathbf{r} y \mathbf{u} :

$$\mathbf{r} = \mathbf{E}_5 \cdot \Delta \mathbf{z} \quad (37)$$

$$\mathbf{u} = \mathbf{E}_8 \cdot \Delta \mathbf{z} \quad (38)$$

Sea:

$$\Psi = [\mathbf{E}_5 \quad \mathbf{E}_8]^T = \begin{bmatrix} \mathbf{E}_5 \\ \mathbf{E}_8 \end{bmatrix} \quad (39)$$

Entonces:

$$\mathbf{U} = \Psi \cdot \Delta \mathbf{z} \quad (40)$$

$$\text{cov}(\mathbf{U}) = \Psi \cdot \mathbf{W}^{-1} \cdot \Psi^t \quad (41)$$

Los Multiplicadores de Lagrange para los errores de parámetros pueden ser normalizados usando los elementos de la diagonal de la matriz de covarianza Λ definida en (35) [5]:

$$\mathbf{z} = \mathbf{h}(\mathbf{x}, \mathbf{p}_e) + \mathbf{e} \quad (42)$$

Para todo $i = 1 \dots k$, donde k es el número total de parámetros de red identificados.

El denominador en (42) será cero cuando la redundancia de mediciones locales no permita detectar errores de parámetros. En tal caso las mediciones son funciones de parámetros críticos [4].

3. CORRECCIÓN DE PARÁMETROS ERRÓNEOS CON PMUS

A. Cálculo de Parámetros de Líneas de Transmisión

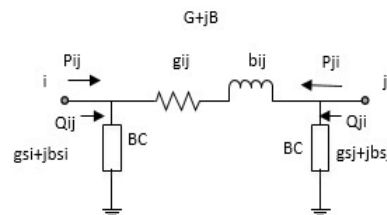


Figura 2: Equivalente de una línea de transmisión [7]

De las ecuaciones de flujo de potencia:

$$P_{ij} = V_i^2 (g_{ij} + g_{si}) - V_i V_j (g_{ij} \cos \theta_{ij} + b_{ij} \sin \theta_{ij}) \quad (43)$$

$$Q_{ij} = -V_i^2 (b_{ij} + b_{si}) - V_i V_j (g_{ij} \sin \theta_{ij} - b_{ij} \cos \theta_{ij}) \quad (44)$$

Se asume que:

$$g_{si} = 0$$

$$g_{ij} = g_{ji} = G$$

$$b_{ij} = b_{ji} = B$$

Asumiendo: $\phi = 0$ (51)

$$g_{ij} = 0$$
 (52)

En forma matricial (45):

$$\begin{bmatrix} G \\ B \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (V_i^2 - V_i V_j \cos(\theta_i - \theta_j)) & -(V_i V_j \sin(\theta_i - \theta_j)) \\ (V_j^2 - V_j V_i \cos(\theta_j - \theta_i)) & -(V_j V_i \sin(\theta_j - \theta_i)) \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} P_{ij} \\ P_{ji} \end{bmatrix}$$

Siendo:

$$b_{si} = BC$$

Se tienen las ecuaciones (46) para Q y (47) y (48) para BC:

$$Q_{ij} = -(V_i V_j \sin \theta_{ij}) G - (V_i^2 - V_i V_j \cos \theta_{ij}) B - V_i^2 BC$$
 (46)

$$BC = \frac{1}{V_i^2} [-(V_i V_j \sin(\theta_i - \theta_j)) G - (V_i^2 - V_i V_j \cos(\theta_i - \theta_j)) B - Q_{ij}]$$
 (47)

$$BC = \frac{1}{V_j^2} [-(V_j V_i \sin(\theta_j - \theta_i)) G - (V_j^2 - V_j V_i \cos(\theta_j - \theta_i)) B - Q_{ji}]$$
 (48)

De esta manera con las mediciones obtenidas con las PMUs pueden calcularse los parámetros G, B y BC que definen a la línea de transmisión.

B. Cálculo de Parámetros de Transformador de dos devanados con tap o LTC

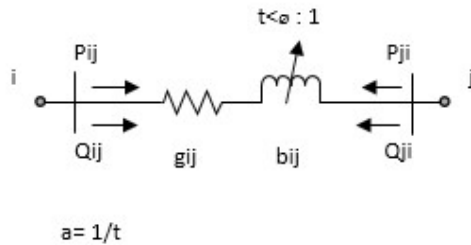


Figura 3: Diagrama equivalente de un transformador de dos devanados

Haciendo la analogía del transformador con una línea de transmisión que no tiene ramas en paralelo, con $g_{si}=0$ y $b_{si}=0$ se aplican las ecuaciones 49 - 56:

$$P_{ij} = (V_i^2 - V_i V_j \cos \theta_{ij}) g_{ij} - (V_i V_j \sin \theta_{ij}) b_{ij}$$
 (49)

$$Q_{ij} = -(V_i V_j \sin \theta_{ij}) g_{ij} - (V_i^2 - V_i V_j \cos \theta_{ij}) b_{ij}$$
 (50)

Se tiene:

$$P_{ij} = -(a V_i V_j \sin(\theta_i - \theta_j)) b_{ij}$$
 (53)

$$Q_{ij} = -(a^2 V_i^2 - a V_i V_j \cos(\theta_i - \theta_j)) b_{ij}$$
 (54)

Entonces con las mediciones de $V_i, V_j, \theta_i, \theta_j, P_{ij}, Q_{ij}$ tomadas de las PMUs, se calculan los parámetros a y b_{ij} :

$$a = \frac{(Q_{ij} V_j \sin(\theta_i - \theta_j)) + V_j P_{ij} \cos(\theta_i - \theta_j)}{V_i P_{ij}}$$
 (55)

$$b_{ij} = - \frac{P_{ij}}{(a V_i V_j \sin(\theta_i - \theta_j))}$$
 (56)

Si en la rama del transformador se disponen PMUs instalados en los dos extremos, las mediciones de: $V_i, V_j, \theta_i, \theta_j, P_{ij}, Q_{ij}$ son datos, con lo cual podrán obtenerse los valores de a y b_{ij} del transformador con las ecuaciones (63) y (64).

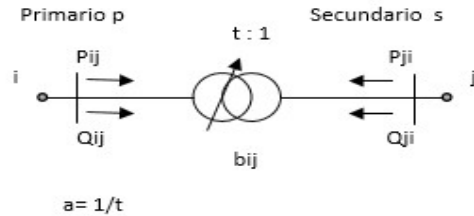


Figura 4: Diagrama simplificado de un transformador de dos devanados

C. Cálculo de Parámetros de Transformador de Tres Devanados con tap en Primario

Los transformadores de tres devanados deben simplificarse a tres transformadores de dos devanados, utilizando las ecuaciones 57 - 59 para pasar de un modelo delta a estrella.

$$x_p = \frac{x_{pt} + x_{ps} - x_{st}}{2}$$
 (57)

$$x_s = \frac{x_{ps} + x_{st} - x_{pt}}{2}$$
 (58)

$$x_t = \frac{x_{pt} + x_{st} - x_{ps}}{2} \quad (59)$$

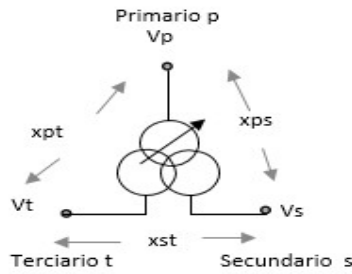


Figura 5: Transformador de tres devanados con tap en primario

Donde: x_p , x_s , x_t son reactancias de primario, secundario y terciario; x_{p-s} , x_{p-t} , x_{s-t} son las correspondientes reactancias mutuas y V_p , V_s , V_t son voltajes en primario, secundario y terciario.

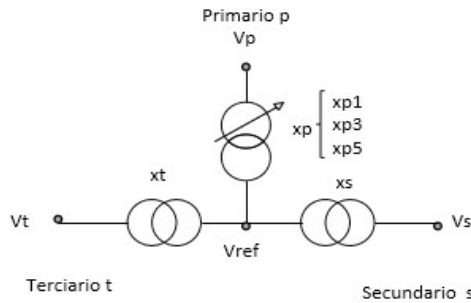


Figura 6: Transformador de tres devanados con tap en primario modelado con tres transformadores de dos devanados

En base a las ecuaciones anteriores se puede encontrar las reactancias correspondientes a cada posición de tap, como se observa en las siguientes ecuaciones para el tap 1:

$$x_{p1} = \frac{x_{p1t} + x_{p1s} - x_{st}}{2} \quad (60)$$

$$x_s = \frac{x_{p1s} + x_{st} - x_{p1t}}{2} \quad (61)$$

$$x_t = \frac{x_{p1t} + x_{st} - x_{p1s}}{2} \quad (62)$$

Una vez obtenido los tres transformadores de dos devanados se aplica lo indicado en la sección B para transformadores de dos devanados. Para calcular los parámetros de los tres transformadores se requiere disponer mediciones de PMUs en al menos dos de sus terminales.

D. Cálculo de Parámetros de Transformador de Tres Devanados con tap en Primario y LTC en secundario

De igual manera que en la sección C, se debe obtener un modelo equivalente de tres transformadores con dos devanados aplicando la misma metodología.

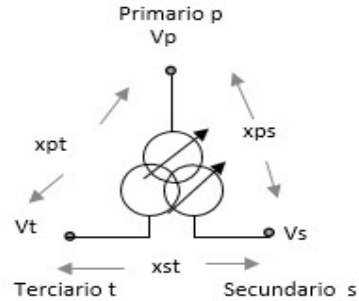


Figura 7: Transformador de tres devanados con tap en primario y LTC en secundario

4. PROGRAMA DE ESTIMACIÓN DE PARÁMETROS

El diagrama de flujo que describe el esquema general del programa se presenta en la Fig. 8:

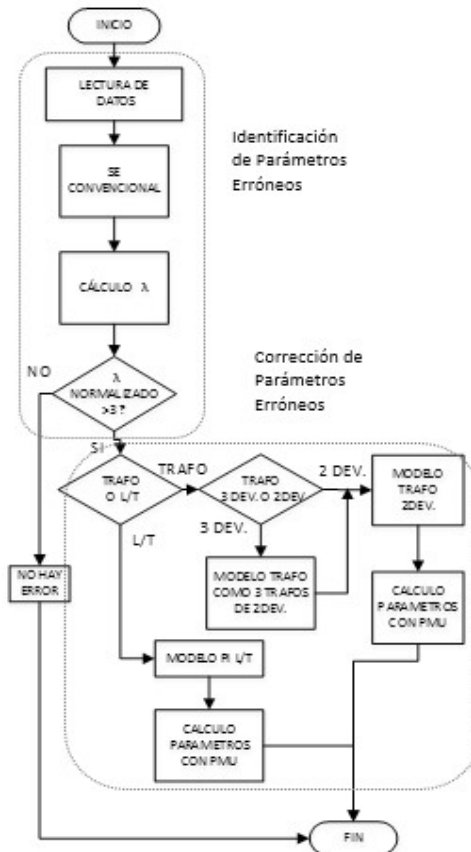


Figura 8: Diagrama de flujo del programa de identificación y corrección de errores de parámetros

A fin de obtener la información de los sistemas de tiempo real y fuera de línea, es necesario desarrollar una interfaz para obtener los dos modelos en la misma referencia con un mismo “Modelo de Referencia de Red”. Este módulo utiliza la base de datos de tiempo real del EMS para obtener los datos de mediciones, del equipamiento que se encuentra en línea y el modelo de red en formato IEEE. La información proveniente del EMS se obtiene con la herramienta dbl (Database Language) y la información proveniente de PowerFactory de DlgSILENT con la interfaz DGS. Como resultado de lo anterior, tres tablas de Excel correspondientes principalmente a barras, ramas y mediciones son creadas para luego ser exportadas al ambiente de MATLAB para la aplicación del programa de identificación de errores de parámetros.

El programa de identificación de datos erróneos así como los programas de corrección de parámetros han sido realizados en forma modular. El diagrama de flujo del programa principal de identificación de datos erróneos se detalla en la Fig. 9.

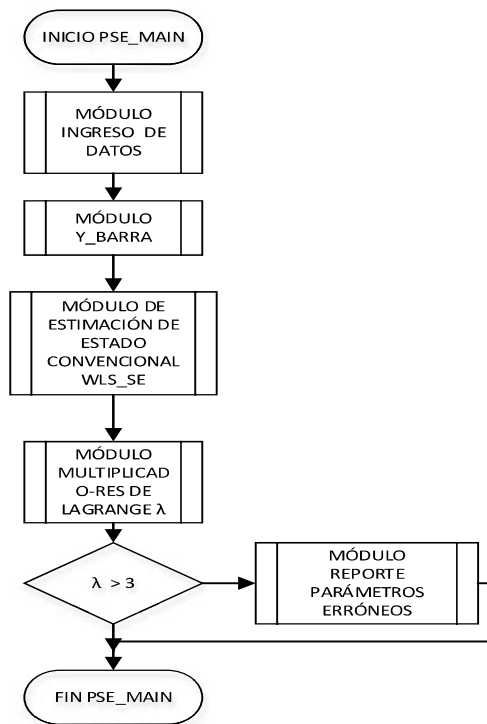


Figura 9: Diagrama de flujo del módulo principal de identificación de errores de parámetros

5. RESULTADOS DE APLICACIÓN DE PROGRAMA AL SISTEMA NACIONAL INTERCONECTADO S.N.I

Se aplica el programa de identificación de parámetros erróneos al S.N.I. de 627 barras en los siguientes escenarios: Demanda base, Demanda media y Demanda punta

Se considera la información de los siguientes modelos: Sistema de tiempo real EMS y Sistema fuera de línea Power Factory de DlgSILENT.

Se presentan resúmenes de los resultados obtenidos de la aplicación en el sistema EMS y en el sistema fuera de línea Power Factory en las Tablas 1 y 2.

Tabla 1: Equipos con multiplicadores de Lagrange mayores a tres en tres condiciones de demanda aplicados al EMS

VALORES ABSOLUTOS DE MULTIPLICADORES DE LAGRANGE APLICADO EN EL SISTEMA EMS					
No	Name	Equip-ment	DEMANDA		
			MÁX	MEDIA	BASE
1	POMA ATU	3X	63,63	30,06	25,96
2	CONO-VICE 138	LINE	30,77	11,73	11,28
3	PANA TF1	2X	23,7	25,7	25,92
4	SROS ATU	3X	15,03	11	10,94
5	MOLI PASC 1 230	LINE	14,47	13,91	11,76

Tabla 2: Equipos con multiplicadores de Lagrange mayores a tres en tres condiciones de demanda aplicados al Power Factory De Digsilent

VALORES ABSOLUTOS DE MULTIPLICADORES DE LAGRANGE APLICADO AL POWER FACTORY DE DIGSILENT						
No	Name	Equip.	KV	DEMANDA		
				MÁX	MEDIA	BASE
1	L_QUEV_SGRE_1_2	LINE	230	28,84	6,80	103,52
2	L_QUEV_SGRE_2_2	LINE	230	28,84	13,09	76,55
3	L_PASC_SALI_1_1	LINE	138	6,26	5,69	64,73
4	L_PASC_SALI_1_2	LINE	138	6,26	5,36	62,03
5	L_MAZA_ZHOR_2	LINE	230	5,78	7,73	121,78
6	L_MOLI_PASC_2_1	LINE	230	3,53	4,08	197,76

Al analizar los resultados indicados en las Tablas 1 y 2 se observa que la línea Molino Pascuales tiene valores altos de su Multiplicador de Lagrange (mayores que 3) en los dos modelos de red: EMS y PowerFactory de DlgSILENT, por lo que sus parámetros pueden ser erróneos; adicionalmente, esta línea dispone de PMUs instalados en los dos extremos, Fig. 10, por lo que es posible aplicar el programa de cálculo de parámetros en esta línea con información de los PMUs disponibles. En la Fig. 11 se indica la densidad de probabilidad del flujo de P en un extremo de la línea Molino – Pascuales.

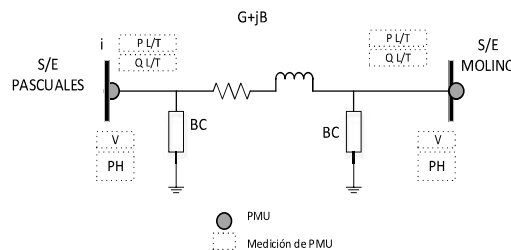


Figura 10: Línea de Transmisión Pascuales 1 Molino 1 con ubicación de PMUs

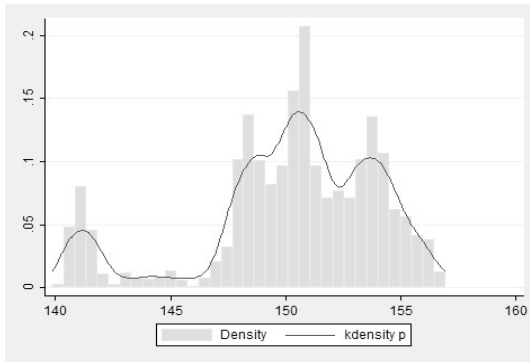


Figura 11: Densidad de Probabilidad de Potencia Activa MOLI-PASC1 Información obtenida de PMU

A fin de observar el impacto real de los parámetros de la línea Pascuales Molino 1 en el Estimador de Estado del EMS, se realiza la corrección de los parámetros erróneos en el sistema EMS con los obtenidos de las mediciones de los PMUs, cuyos residuales se detallan en la Tabla 3.

Tabla 3: Impacto de parámetros de L/T Pasc-Moli 1 en Residuales del EMS

Caso	L/T	Parámetros			Residuales	
		r (pu)	x (pu)	Bc (pu)	P (MW)	Q (MVAR)
Parámetros erróneos	Pasc 1-Moli 1	0,0210	0,1712	0,1729	-2,7	1,1
	Moli 1-Pasc 1				-13,5	2,9
Parámetros correctos	Pasc 1-Moli 1	0,0204	0,1655	0,1883	-0,4	2,4
	Moli 1-Pasc 1				-8,9	1,6

6. CONCLUSIONES

El programa de identificación de parámetros erróneos en un sistema eléctrico ha sido desarrollado para un sistema eléctrico de n barras y ha sido aplicado y validado en el S.N.I. de 627 barras.

Conforme los resultados obtenidos, el algoritmo de identificación de datos erróneos cumple satisfactoriamente con las características esperadas, es decir no requiere un set a priori de parámetros sospechosos y permite identificar los parámetros erróneos independientemente de los errores de medición.

Los Multiplicadores de Lagrange permiten identificar los elementos de la red con parámetros erróneos, en un módulo adicional al algoritmo de estimación de estado.

El programa de identificación de parámetros erróneos permite obtener una lista de prioridad de elementos de red sospechosos de tener errores; tanto en el EMS como en el PowerFactory de DIGSILENT

y si existen las mediciones de PMUs disponibles, realizar la corrección correspondiente.

Una vez identificado el parámetro erróneo, el procedimiento para cambiarlo en el EMS es:

- Tomar un set de mediciones de PMUs
- Procesar estadísticamente las mediciones de los PMUs para obtener los mejores valores de la muestra.
- Calcular los parámetros del elemento de red correspondiente
- Probar los parámetros calculados en el sistema EMS observando su efecto en los residuales durante un período de tiempo en las zonas aledañas y en el sistema total.

Este procedimiento puede ser aplicado a sistemas eléctricos de empresas eléctricas que dispongan de PMUs.

La identificación y corrección de parámetros erróneos de líneas de transmisión y transformadores tiene su impacto en el desempeño del estimador de estado y de las funciones de seguridad del sistema de tiempo real, debido a la disminución de errores de variables de estado y mejoramiento en los tiempos de convergencia.

RECONOCIMIENTOS

Los autores agradecen al Operador Nacional de Electricidad (CENACE) por el acceso a la información del SCADA/EMS, del PowerFactory de DIGSILENT y de los PMUs del sistema WAMS.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] A. Gómez Expósito, A. Abur, A. Alvarado, C. Álvarez, C. Cañizares, J. Cidras, A. Conejo, A. Fernández, F. Galiana, J. García, José Martínez, J. Martínez, F. Miñambres, I. Pérez, V. Quintana, M. Rivier, L. Rouco, J. Usaola, "Análisis y Operación de Sistemas de Energía Eléctrica", España: Mc Graw Hill, 2002.
- [2] A. Gómez Expósito, P. Zarco, "Estimación de Estado y de Parámetros en Redes Eléctricas", España: Universidad de Sevilla, 1999
- [3] P. Zarco, "Estimación de Parámetros en Redes Eléctricas utilizando Históricos de Mediciones", España: Universidad de Sevilla, 1997.
- [4] J. Zhu, A. Abur, "Identification of Network Parameter Errors", IEEE Trans. on Power Systems, vol. 21, n° 2, May. 2006.

- [5] J. Zhu, «“Detection and Identification of Network Parameter Errors using Conventional and Synchronized Phasor Measurements “», Electrical Engineering Dissertation, Northeastern University, January 2008.
- [6] P. Zarco, A. Gómez Expósito, «“Power System Parameter Estimation: A Survey “», IEEE Trans. on Power Systems, vol. 15, n° 1, Feb. 2000.
- [7] A. Abur, A. Gómez Expósito, “Power System State Estimation, Theory and Implementation”, New York: Marcel Dekker, 2004.
- [8] L. Zhang, A. Abur, «“Identifying Parameter Errors via Multiple Measurement Scans”,» IEEE Trans. on Power Systems, vol. 28, n° 4, Nov. 2013.

sustainable energy systems. He is the principal investigator for various research projects under Department of Energy, ARPA-E, EPRI, PSERC and other United States industry and Government sponsors. From 2002 to 2009, he was with PowerWorld Corporation as a software architect and consultant. From 2013 to 2014, he was on assignment to the National Renewable Energy Laboratory (NREL) as founding Director of the Power System Engineering Center (PSEC). Dr. Grijalva’s graduate degrees in Electrical and Computer Engineering, M.Sc. (99), Ph.D. (02) are from the University of Illinois at Urbana-Champaign. His engineering degree in Power System is from EPN-Ecuador (94).



Lourdes Farinango Cisneros: Ingeniera Eléctrica (1996) E.P.N. Master en Ciencias de Ingeniería Eléctrica (2015), E.P.N. Egresada Maestría en Energías Renovables (2013), ESPE.

Actualmente, encargada de la administración de las Funciones de Aplicación y de la Base de Datos de Modelación Eléctrica del EMS del Operador Nacional de Electricidad CENACE.



Santiago Grijalva: is the Georgia Power Distinguished Professor of Electrical and Computer Engineering and Director of the Advanced Computational Electricity Systems (ACES) Laboratory at The Georgia Institute of Technology. His research

interest is on decentralized power system control, power system informatics and economics, and future



Jesús Játiva Ibarra: Ingeniero Eléctrico (1981) de la Escuela Politécnica Nacional; Master of Science in Electrical Engineering (1988) y Doctor of Philosophy Ph.D. (1991) de la Universidad de Texas en Arlington Estados Unidos de América. Cursos de postgrado

en Energy Conservation in Industry realizado en Suecia en 1995 y en Development Planning Techniques with Computer Applications efectuado en los Países Bajos en 1998. Cuenta con más de treinta años de experiencia en actividades de Planificación, Operación, Administración y Economía de sistemas eléctricos de potencia. Actualmente es Profesor Principal de la EPN.