**ESTIMACIÓN DE ESTADO DE SISTEMAS DE POTENCIA UTILIZANDO LA FUNCIÓN LSQNONLIN DE MATLAB®**

Ana Karen Ramblas-Vargas, José David Filoteo-Razo, Enrique Arnoldo Zamora-Cárdenas, Alejandro Pizano-Martínez, José Merced Lozano-García.

División de ingenierías Campus Irapuato-Salamanca, Salamanca, Gto., ramblashh@hotmail.com,

jd.filoteorazo@ugto.mx, ezamora@ugto.mx, apizano@ugto.mx, jm.lozano@ugto.mx

ResumEn:

Estimación de estado es una de las aplicaciones más importantes de los Centros de Control de Energía que permite monitorear el comportamiento de un sistema eléctrico de potencia. En la actualidad los sistemas eléctricos de potencia están sufriendo cambios significativos a través de la modernización de su infraestructura y forma de operarlos. En este sentido, el desarrollo de herramientas de software especializado es muy importante tanto en el área de investigación como en las de docencia y capacitación. En este sentido, la aplicación de estimación de estado se basa en la formulación de un problema de optimización a partir de un conjunto redundante de mediciones disponibles. En este trabajo se utiliza la técnica de Mínimos Cuadrados Ponderados para procesar el conjunto disponible de mediciones y minimizar el error de estas. Además, se presenta el desarrollo de la implementación práctica de un estimador de estado desarrollado en Matlab®. El programa desarrollado es general y utiliza la herramienta lsqnonlin de Matlab® para el proceso de optimización. La efectividad del estimador de estado desarrollado es validada a través de la comparación de sus resultados con los resultados de un estudio de flujos de carga. También, se llevó a cabo su comparación de resultados con otro estimador cuyo algoritmo de Mínimos cuadrados Ponderados fue completamente generado e implementado en un código digital. Estas comparaciones realizadas considerando mediciones ideales validan perfectamente el desempeño del estimador desarrollado. Lo anterior permite contar con una herramienta eficiente y adecuada para el rápido desarrollo de investigación y formación de recursos humanos tanto a nivel de Licenciatura como a nivel de posgrado. El experimento de validación del software del estimador de estado desarrollado se realizó a través de la simulación de un sistema real de 9 nodos.

1. Introducción

La estimación de estado en sistemas de potencia es la base de las funciones de monitoreo en línea que se llevan a cabo en los centros de control de energía para garantizar la seguridad de las redes de energía eléctrica [1]. El proceso de estimación de estado se basa en la disponibilidad de un conjunto de mediciones físicas recolectado a través de un sistema de control supervisorio y adquisición de datos (SCADA por sus siglas en Ingles), y un modelo de red. Un estimador de estado es una herramienta de optimización que determina el mejor estimado del vector de estados de un sistema de potencia en tiempo real, minimizando el error aleatorio contenido en el conjunto de mediciones [1]. En la década de los 70’s se buscó un planteamiento matemático que permitiera utilizar la información recopilada del sistema, que tuviera la habilidad de calcular el estado de un sistema aun cuando los datos fueran erróneos, así como proporcionar resultados con un alto nivel de confiabilidad. Se sugirió aplicar el concepto de Estimación de Estado, de esta forma se implementó la Estimación de Estado (magnitudes de voltaje y los ángulos de fase nodales) en los SEPs, cuyos resultados son la base de las aplicaciones que se llevan a cabo en los centros de control de energía (CCE) [2-4]. En la actualidad el avance del desarrollo tecnológico está teniendo un crecimiento exponencial, lo cual genera la necesidad de desarrollar y probar rápidamente nuevos modelos matemáticos de tecnologías innovadoras, así como su integración en las herramientas de análisis de sistemas de potencia. En este sentido resulta muy importante el desarrollo de software adecuado para satisfacer dichas necesidades. En este artículo se propone la implementación práctica de un estimador de estado de sistemas de potencia utilizando el toolbox de optimización de Matlab [5]. El estimador de estado ha sido desarrollado en base a una estructura modular que permite la implementación rápida y sencilla de nuevos modelos matemáticos, con el mínimo requerimiento de desarrollo de código digital, acelerando de esta manera los tiempos de obtención de resultados y por tanto del desarrollo de investigación. El estimador de estado propuesto está basado en la técnica de optimización de Mínimos Cuadrados Ponderados, la cual consiste en minimizar la sumatoria de los cuadrados de los errores de las mediciones. Este proceso de optimización se lleva a cabo a través de la función lsqnonlin(…) la cual utiliza el método de solución Trust-Region-Reflective [6].

2 Estimación de estado mediante Mínimos Cuadrados Ponderados

La medición física junto con su error acumulado se modela de la siguiente manera:

 (1)

donde : vector del conjunto de mediciones físicas de dimensión ; : vector de las variables de estado de dimensión ; : relación matemática entre las mediciones y variables de estado (ó vector de funciones no lineales) de dimensión ; : vector de errores acumulados a las mediciones físicas de dimensión . Reordenando (1)

 (2)

Como el estado verdadero  no se conoce se utiliza el estimado  , para evaluar la función cuadrática del método con el error estimado. Por simplicidad se usará  para el estimado, es decir . La función cuadrática de Mínimos Cuadrados Ponderados que debe ser minimizada es

  (3)

donde  es una matriz diagonal de ponderaciones, cuyos elementos son los recíprocos de las varianzas de error de las mediciones correspondientes ,  . Los elementos  son las desviaciones estándar de las mediciones y se encuentran asociados con la precisión de los instrumentos de medición.

**2.1 Ecuaciones de medición de flujo de potencia en líneas de transmisión**

En este trabajo se usa el modelo  de la línea de transmisión como se muestra en la Figura 1. Las ecs. (4)-(7) son la representación matemática de las mediciones flujo de potencia activa y reactiva.

 (4)

 (5)

 (6)

  (7)



Figura 1. Modelo  de una línea de transmisión.

donde las admitancias complejas de la red son,

; 

; 

Mientras que las admitancias primitivas serie y derivación de la línea de transmisión son  y , respectivamente.

**2.2 Ecuaciones de medición de flujo de potencia en transformadores**

Para considerar cambios de tap fuera del nominal el transformador de dos devanados se modela mediante taps complejos. Además, se considera el efecto de no-linealidad de la rama magnetizante bajo condiciones de saturación para tomar en cuenta las pérdidas en el núcleo. El circuito equivalente del transformador de dos devanados se muestra en la Figura 2.



**Figura 2.** Circuito equivalente del transformador de dos devanados.

El devanado primario es representado como un transformador ideal teniendo taps complejos  y  en serie con la impedancia , donde . El \* indica la operación conjugada. También, el devanado secundario se representa como un transformador ideal teniendo taps complejos  y en serie con la impedancias, donde . La matriz de admitancia de transferencia relacionando el voltaje  y la corriente  en el primario al voltaje  y la corriente  en el secundario del transformador de dos devanados está dada por la ecuación (8),

 (8)

donde

; ; ; 

; 

; 

; ; ; 

; 

; ; ; ;

Los transformadores de potencia utilizan las mismas ecuaciones de flujo de potencia que para las líneas de transmisión (4-7), pero con las admitancias del modelo del transformador (8).

**3 IMPLEMENTACIÓN PRÁCTICA DEL ESTIMADOS DE ESTADO**

La minimización de la función objetivo se lleva a cabo a través de la función lsqnonlin(∙) del toolbox de optimización de MATLAB [5], la cual calcula la suma de los cuadrados de los errores de medición utilizando el método Trust-Region-Reflective [6]. La estructura de esta función y la descripción de sus argumentos de entrada y salida son como sigue:



**Tabla 1.** Descripción de los argumentos de entrada y salida

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| **Nombre** | **Descripción** | **Nombre** | **Descripción** |
| @fun | Función definida por el usuario para calcular la suma de los cuadrados de los errores de medición | x | Vector de estado estimado del sistema |
| x**0** | Condición inicial del vector de estado del Sistema ***Θ*** and ***V*** , i.e. x =[***θ*0** ***V*0**]’ | resnorm | Valor de la función objetivo en la solución x |
| lb | Vector de límites inferiores de los estados estimados | exitflag | Número entero que identifica la razón de paro del algoritmo |
| Ub | Vector de límites superiores de los estados estimados | output | Estructura con información de los resultados del proceso de optimización |
| options | Esta estructura proporciona parámetros opcionales para el proceso de minimización, las cuales son establecidas por la función optimoptions de MATLAB**®** | lambda | Estructura conteniendo los multiplicadores de Lagrange en la solución x  |
|  |  | jacobian | Matriz Jacobiana  |

**3.1 RESULTADOS DE SIMULACIÓN**

Las mediciones sin error son tomadas de la simulación de un programa de flujos de carga convencional. Se utilizaron 43 mediciones las cuales son suficientes para solucionar un sistema de 36 ecuaciones por 17 variables de estado, con 19 grados de libertad. Se utilizaron 24 mediciones de flujo de potencia en líneas de transmisión y 12 de flujo de potencia en trasformadores.En la Tabla 2 se presenta la comparación entre las variables de estado calculadas mediante el programa de flujos de carga y las estimadas mediante el estimador de estado desarrollado. Se puede observar en la tabla que ambos resultados son prácticamente los mismos. El valor de la función cuadrática  de mínimos cuadrados es , debido a que las mediciones no contienen ruido. El algoritmo llegó a la convergencia en 8 iteraciones. Con esto se valida el funcionamiento correcto del estimador de estado desarrollado.

**Tabla 2.** Variables de estado calculadas y estimadas del sistema IEEE-9.

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| Nodo | **Voltajes calculados** | **Voltajes estimados** |
| **(p.u)** | **(grados)** | **(p.u)** | **(grados)** |
| 1 | 1 | 0 | 1 | 0 |
| 2 | 1.025 | 9.0058 | 1.025 | 9.0059 |
| 3 | 1.025 | 4.3230 | 1.025 | 4.3231 |
| 4 | 0.995 | -2.3817 | 0.995 | -2.3817 |
| 5 | 0.9718 | -4.3225 | 0.9718 | -4.3226 |
| 6 | 0.9895 | -4.0106 | 0.9895 | -4.0107 |
| 7 | 1.0191 | 3.4091 | 1.0191 | 3.4091 |
| 8 | 1.0092 | 0.3683 | 1.0092 | 0.3683 |
| 9 | 1.0262 | 1.6088 | 1.0262 | 1.6089 |

4 CONCLUSIONES

Se desarrolló un estimador de estado de sistemas de potencia basado en la técnica de mínimos cuadrados ponderados. El estimador utiliza la función lsqnonlin (…), la cual resuelve el problema de estimación de estados mediante el método Trust-Region-Reflective. Los resultados del estimador de estado desarrollado son validados mediante su comparación con los resultados de un programa de flujos de carga, los cuales proporcionaron prácticamente la misma solución.

**BIBLIOGRAFÍA**

1. A. Monticelli, “state estimation in electric power systems a generalized approach,” (kluwer academic publishers, boston, 2001).
2. F.c. schweppe and j. Wildes, “power system static-state estimation-part i:exact model”, ieee trans. Power app. Syst., pas-89, no. 1, pp. 120-125, january 1970
3. F.c. schweppe and d.b. rom, “power system static-state estimation-part ii:approximate model”, ieee trans. Power app. Syst., pas-89, no. 1, pp. 126-130, january 1970
4. F.c. schweppe, “power system static-state estima-tion-part iii:implementation”, ieee trans. Power app. Syst., pas-89, no. 1, pp. 130-135, january 1970
5. The mathworks, inc., “matlab optimization toolbox,” users guide version 2, available at <http://www.mathworks.com/>.
6. Coleman, t.f. and y. Li, "an interior, trust region approach for nonlinear minimization subject to bounds," siam journal on optimization, vol. 6, pp. 418–445, 1996.