

Desarrollo de un estimador de estado lineal para sistemas de potencia utilizando mediciones pmu

Autor¹

¹Victor Manuel Ortega Arroyo
vm.ortegaarroyo@ugto.mx¹

Autor²

²Christopher Juan Pablo Ortega Witrago
cjp.ortegawitrago@ugto.mx²

Autor³

³Enrique Arnoldo Zamora Cárdenas
ezamora@ugto.mx³

Resumen

En este trabajo de investigación se presenta la implementación y resultados obtenidos de un estimador de estado lineal basado en la técnica de mínimos cuadrados ponderados. La implementación del estimador se realiza a través de un código digital desarrollado en Matlab. Los resultados del estimador de estado se validaron con los resultados del estudio de flujos de carga del sistema de potencia de 14 nodos del IEEE. Además, se investigó la precisión la cual se probó mediante la comparación de 3 formas de solución del sistema lineal del estimador.

Palabras clave: Estimación de estado lineal; mínimos cuadrados ponderados; PMUs.

Introducción

La estimación del estado operativo de un sistema eléctrico de potencia proporciona el estatus instantáneo del sistema al operador de la red eléctrica para realizar acciones de control adecuadas en "tiempo real", cuya función es mantener el sistema en su estado de operación normal [1]-[2]. En la actualidad, la mayoría de los estimadores de estado utilizan aún tecnologías de adquisición de datos de medición basadas en sistemas de supervisión, control y adquisición de datos (SCADA, por sus siglas en Inglés), sin embargo, este tipo de tecnología cuenta con una velocidad de adquisición de datos en promedio de 4 a 6 segundos [3]-[4]. Por otro lado, nuevas tecnologías de medición basadas en unidades de medición fasorial (PMU, por sus siglas en Inglés) son capaces de proporcionar datos medidos en un orden de 30 a 60 veces por segundo [5]-[6]. Esto proporciona grandes ventajas a los esquemas de medición existentes permitiendo además mejorar ampliamente el desempeño de los estimadores de estado existentes. En este sentido, existen varias diferencias entre esquemas de medición basados en medidores SCADA y PMU, las cuales mejoran los procesos de estimación de estado de los sistemas potencia haciéndolos más rápidos y precisos, como se describe a continuación: los esquemas de medición basados en PMUs proporcionan mediciones de fasores de voltaje y flujo corriente de los nodos donde estos se encuentran ubicados, mientras que los esquemas de medición basados en mediciones SCADA proporcionan magnitudes de voltaje e inyecciones de potencia en nodos, así como flujos de potencia y de corriente de ramas de transmisión. La gran diferencia de velocidad a la que proporcionan mediciones ambas tecnologías hace que los estimadores de estado basados en PMUs sean más rápidos y precisos ya que adquieren mediciones más rápidamente [7], y su formulación lineal permite soluciones no iterativas que requieren menor tiempo que los estimadores no lineales basados en esquemas de medición SCADA. Además, la gran cantidad de muestras de medición que proporcionan los PMUs por segundo y la capacidad de medir los ángulos de fase proporcionan mucho mayor precisión a los estimadores de estado que en el caso de estimadores con mediciones SCADA.

En la industria eléctrica, principalmente en los centros de control de energía (CENACE) de los sistemas eléctricos de potencia, el estimador de estado se utiliza para filtrar los errores de medición y estimar el estado operativo de la red eléctrica en tiempo real, para garantizar la calidad y precisión de los fasores de voltaje de la red que son utilizados en importantes aplicaciones de seguridad y control que se realizan en el CENACE [8]. Actualmente, los estimadores de estado que se utilizan en la industria eléctrica se basan en la técnica de optimización de mínimos cuadrados ponderados [9].

En este trabajo de investigación se presenta la implementación de un estimador de estado lineal basado en la técnica de mínimos cuadrados ponderados, el cual utiliza un esquema de medición basado únicamente en PMUs. La implementación del estimador se realizó mediante la creación de un programa digital general desarrollado en MATLAB, el cual formula el problema de optimización para el proceso de estimación de estado, sin embargo, la solución es obtenida mediante la función predefinida "lsqin(...)" del toolbox de MATLAB, la cual fue utilizada y adecuada para resolver el problema de estimación de estado lineal formulado. Los resultados numéricos obtenidos son comparados con los resultados de un estudio de flujos de carga para validar el estimador de estado implementado. Los resultados del estudio de flujos son considerados como mediciones físicas reales para el esquema de medición del estimador de estado. Un análisis de la precisión de la solución del estimador de estado es presentado considerando diferentes formas de solucionar el problema. Finalmente, la validación numérica del estimador implementado se realizó considerando el sistema de prueba de 14 nodos del IEEE.

Algoritmo lineal basado en mínimos cuadrados ponderados

Considere el modelo matemático de una medición lineal que se muestra en (1)

$$\mathbf{Z} = \mathbf{H}\mathbf{X} + \boldsymbol{\varepsilon}, \quad (1)$$

donde $\mathbf{Z} \in \mathfrak{R}^m$ es el vector que contiene los fasores medidos por los PMUs ubicados en la red eléctrica, $\mathbf{X} \in \mathfrak{R}^n$ es el vector con las variables de estado de la red (voltajes de nodo), y $\mathbf{H} \in \mathfrak{R}^{(m \times n)}$ es una matriz de coeficientes que relaciona linealmente a las mediciones físicas \mathbf{Z} con las variables de estado \mathbf{X} . Por último, $\boldsymbol{\varepsilon} \in \mathfrak{R}^m$ es un vector de ruido aleatorio asociado con las mediciones PMU. Despejando el vector de errores de (1) se obtiene el vector de residuos de mediciones estimadas (2), el cual debe ser minimizado utilizando el método de mínimos cuadrados ponderados.

$$\hat{\mathbf{r}} = \mathbf{Z} - \mathbf{H}\hat{\mathbf{X}}. \quad (2)$$

La solución resultante de esta minimización es el sistema lineal que se muestra en (3), donde $\hat{\mathbf{X}}$ es el vector de variables de estado estimadas, \mathbf{W} es una matriz diagonal de covarianzas de error de las mediciones físicas que ponderan la precisión de los dispositivos de medición.

$$[\mathbf{H}^T \mathbf{W} \mathbf{H}] \hat{\mathbf{X}} = \mathbf{H}^T \mathbf{W} \mathbf{Z} \quad (3)$$

Modelo lineal de la red eléctrica

El modelo matemático de los elementos de rama de la red relaciona las variables de estado con las terminals de los elementos en coordenadas rectangulares. Por ejemplo, las relaciones de flujo de corriente están dadas por (4), utilizando el modelo π de la línea de transmisión conectada entre los nodos k y m , donde las admitancias complejas de sistema $\bar{Y}_{kk} = G_{kk} + jB_{kk} = \bar{y}_{km}^{sh} + \bar{y}_{km}$ y $\bar{Y}_{km} = G_{km} + jB_{km} = -\bar{y}_{km}$ son calculadas de las admitancias primitivas en serie y derivación, es decir, \bar{y}_{km} y \bar{y}_{km}^{sh} , respectivamente.

$$\begin{bmatrix} I_{km,r} \\ I_{km,i} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} G_{kk} & G_{km} & -B_{kk} & -B_{km} \\ B_{kk} & B_{km} & G_{kk} & G_{km} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{k,r} \\ V_{m,r} \\ V_{k,i} \\ V_{m,i} \end{bmatrix}. \quad (4)$$

Esquema de medición basado en PMUs

La representación matemática del esquema de medición es un conjunto de ecuaciones algebraicas lineales dado por

$$\underbrace{\begin{bmatrix} \mathbf{V}_{k,r}^{PMU} \\ \mathbf{V}_{k,i}^{PMU} \\ \mathbf{I}_{km,r}^{PMU} \\ \mathbf{I}_{km,i}^{PMU} \end{bmatrix}}_{\mathbf{Z}} = \underbrace{\begin{bmatrix} \mathbf{1} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{1} \\ \mathbf{H}_{11}^{PMU} & \mathbf{H}_{12}^{PMU} \end{bmatrix}}_{\mathbf{H}} \underbrace{\begin{bmatrix} \mathbf{V}_r \\ \mathbf{V}_i \\ \mathbf{X} \end{bmatrix}}_{\mathbf{X}}, \quad (5)$$

donde $\mathbf{1} \in \mathfrak{R}^{(N_{PMU} \times N_b)}$ es una submatriz binaria, mientras que N_{PMU} and N_b son el número de PMUs y de nodos del sistema, respectivamente. Además, $\mathbf{H}_{ij}^{PMU} \in \mathfrak{R}^{(N_{PMU} \times N_b)}$ son submatrices dispersas constantes de las admitancias del sistema, $\forall i, j = 1, 2$, cuya estructura está dada por (6). En este caso, N_i^{PMU} es el número de mediciones PMU de flujo de corrientes de rama.

$$\mathbf{H}_{11} = \begin{bmatrix} \mathbf{G}_{kk} & \mathbf{G}_{km} \\ \mathbf{B}_{kk} & \mathbf{B}_{km} \end{bmatrix}; \quad \mathbf{H}_{12} = \begin{bmatrix} -\mathbf{B}_{kk} & -\mathbf{B}_{km} \\ \mathbf{G}_{kk} & \mathbf{G}_{km} \end{bmatrix}. \quad (6)$$

Notar que el esquema de medición basado en PMUs permite desarrollar un estimador de estado lineal cuyo algoritmo de solución se basa en una sola etapa de estimación no iterativa, el cual no tiene problemas de convergencia y no requiere de una condición inicial, como en el caso de la solución de los estimadores no lineales basados en esquemas de medición SCADA.

Análisis y resultados de la simulación

La efectividad y precisión del estimador de estado lineal basado en mínimos cuadrados ponderados son probadas utilizando el sistema de 14 nodos del IEEE, cuya red eléctrica consta de 14 nodos, 15 líneas de transmisión y 5 transformadores de potencia, como se muestra en la Figura 1.

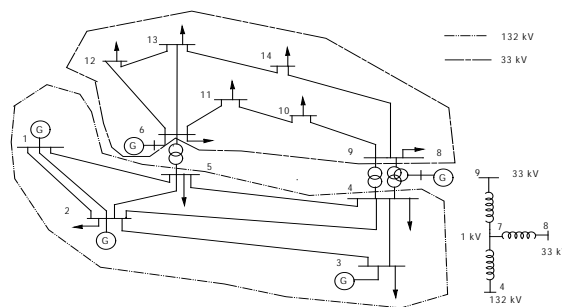


Figura 1. Sistema de 14 nodos IEEE.

El esquema de medición utilizado consta de 4 PMUs ubicados en los nodos 2, 6, 7 y 9, los cuales son suficientes para observar la red eléctrica completa mediante 32 mediciones PMU, tanto de voltajes como de flujo de corrientes. Los valores de desviación estándar utilizados para las componentes real e imaginaria de las mediciones transformadas a coordenadas rectangulares son $\sigma_{V_{k,r}}^{PMU} = \sigma_{I_{km,r}}^{PMU} = 0.002$ and $\sigma_{V_{k,i}}^{PMU} = \sigma_{I_{km,i}}^{PMU} = 0.0017$, respectivamente. El conjunto de mediciones utilizado fue tomado de los resultados de simulación de un estudio de flujos de carga. Para fines de validación de la precisión del estimador lineal implementado en estas simulaciones se consideró que las mediciones no contienen errores de medición. En este sentido, el estado estimado del perfil de voltajes de la red proporcionado por el estimador de estado debe coincidir con el perfil

de voltajes calculado con el estudio de flujos de carga, el cual se muestra en la Tabla 1. Además, la solución del sistema lineal del estimador de estado fue obtenido en 3 formas diferentes y la precisión de cada una de dichas soluciones fue comparada con los valores verdaderos del resultado de flujos de carga. Para determinar la precisión de estas soluciones se cuantificó el error contenido en cada una de ellas mediante índices de error basados en la sumatoria de los errores absolutos de las magnitudes y ángulos de voltaje de la red eléctrica.

Tabla 1. Vector de estados calculado, sistema IEEE14.

Nodo	Magnitud de voltaje (pu)	Ángulo de fase (grados)
1	1.000000000000000	0
2	1.045000000000000	-6.482628196428498
3	1.010000000000000	-14.283186169482418
4	1.007890349047073	-11.680933267250905
5	1.006047638014627	-10.094645532469162
6	1.070000000000000	-15.855149653604331
7	1.047468838657332	-14.681914187029882
8	1.090000000000000	-14.681914187029882
9	1.030934983496775	-16.259522815257899
10	1.030253203360371	-16.469924175323335
11	1.046297598316858	-16.279435065635578
12	1.053294644063112	-16.707307858707647
13	1.046692321560470	-16.743878757484634
14	1.019531501192946	-17.498891562813117

La solución de la ecuación (3) proporciona el vector de estados estimados del sistema, en este trabajo de investigación se utilizaron las 3 formas de resolver dicha ecuación lineal que se muestran en la Tabla 2, donde la solución del caso 1 corresponde a la solución del sistema lineal (3) mediante la división matricial del vector $\mathbf{H}^T \mathbf{W} \mathbf{Z}$ entre la matriz de ganancia $[\mathbf{H}^T \mathbf{W} \mathbf{H}]$, lo cual en MATLAB se ejecuta ordenando el siguiente comando: $\hat{\mathbf{X}} = [\mathbf{H}^T * \mathbf{W} * \mathbf{H}] \setminus \mathbf{H}^T * \mathbf{W} * \mathbf{Z}$. Para el caso 2, la solución corresponde a las formas normales para lo cual se considera la inversión de la matriz de ganancia, lo que en MATLAB se ejecuta como $\hat{\mathbf{X}} = \text{inv}(\mathbf{H}^T * \mathbf{W} * \mathbf{H}) * \mathbf{H}^T * \mathbf{W} * \mathbf{Z}$. Por último, para el caso 3, se utilizó la función predefinida "lsqin (...)" de MATLAB la cual minimiza el cuadrado de la media de los errores de medición $\frac{1}{2}(\mathbf{Z} - \mathbf{H}\mathbf{X})^2$ utilizando la técnica de mínimos cuadrados, para lo cual utiliza como argumentos de entrada la matriz de coeficientes constantes \mathbf{H} y el vector de mediciones \mathbf{Z} . Es importante señalar que en su definición original esta función no considera las ponderaciones de las mediciones, por lo que para este trabajo determina como argumento los productos $\mathbf{W} * \mathbf{H}$ y $\mathbf{W} * \mathbf{Z}$, obteniendo de esta manera una minimización mediante la técnica de mínimos cuadrados ponderados.

Tabla 2. Formas de solución del estimador lineal.

Caso	Solución
1	$[\mathbf{H}^T \mathbf{W} \mathbf{H}] \hat{\mathbf{X}} = \mathbf{H}^T \mathbf{W} \mathbf{Z}$
2	$\hat{\mathbf{X}} = [\mathbf{H}^T \mathbf{W} \mathbf{H}]^{-1} \mathbf{H}^T \mathbf{W} \mathbf{Z}$
3	$\hat{\mathbf{X}} = \text{lsqin}(\mathbf{W} * \mathbf{H}, \mathbf{W} * \mathbf{Z}, [], [])$

Tabla 3. Porcentajes de error de vectores de estado estimados.

Caso	% de error absoluto	Tiempo de CPU
1	4.768797224316557e-06	0.000939 s
2	4.768797221360588e-06	0.000370 s
3	4.768818272146702e-06	0.044945 s

En la Tabla 3 se muestran los porcentajes de error absoluto de los vectores de estado estimados considerando las diferentes soluciones de los 3 casos. De los porcentajes de error mostrados en la columna 2 se puede observar que la precisión en los 3 casos es muy buena, de lo cual, se puede determinar que los resultados obtenidos en los 3 casos son muy similares y por tanto esto valida el estimador lineal implementado. Además, observando los 3 porcentajes se puede identificar que para la solución del caso 2 el estimador obtiene el menor error global (solución más precisa), así como el menor tiempo de CPU, mientras

que es claro que para el caso 3 se obtiene la mayor imprecisión además del mayor tiempo de cómputo. Desde un punto de vista práctico, la precisión de los 3 casos es muy alta.

Conclusiones

En este trabajo de investigación se presenta la implementación de un estimador de estado lineal de sistemas de potencia utilizando un esquema de medición con observabilidad completa, el cual consiste únicamente en 4 PMUs. Los resultados del estimador se obtuvieron utilizando 3 formas de solución del sistema lineal obtenido de la formulación basada en el método de mínimos cuadrados ponderados. Con las 3 formas de solución utilizadas los resultados obtenidos validaron la implementación del código digital desarrollado, los cuales fueron comparados con los resultados del estudio de flujos de carga.

Referencias

- [1] Florez, H.A.R.; Marujo, D.; López, G.P.; López-Lezama, J.M.; Muñoz-Galeano, N. State Estimation in Electric Power Systems Using an Approach Based on a Weighted Least Squares Non-Linear Programming Modeling. *Electronics* 2021, 10, 2560. <https://doi.org/10.3390/electronics10202560>.
- [2] Monticelli, A. *State Estimation in Electric Power Systems: A Generalized Approach*. Island Press, 1999.
- [3] X. Liu, X. Zeng, L. Yao, G. I. Rashed and C. Deng, "Power System State Estimation Based on Fusion of WAMS/SCADA Measurements: A Survey," 2018 2nd IEEE Conference on Energy Internet and Energy System Integration (EI2), Beijing, China, 2018, pp. 1-6, doi: 10.1109/EI2.2018.8582102.
- [4] G. Beißler, H.-T. Neisius, G. Schellstede, I. Slutsker, M. Mirheydar, SCADA-Oriented State Estimation, *IFAC Proceedings Volumes, Volume 30, Issue 17, 1997, Pages 413-418, ISSN 1474-6670*, [https://doi.org/10.1016/S1474-6670\(17\)46441-X](https://doi.org/10.1016/S1474-6670(17)46441-X).
- [5] Afaf Saoud and Abdelmadjid Recioui, "PMU Reporting Rate Optimization for Data Transfer Enhancement in Wide Area Monitoring Systems", *IEEE*, p. 1, 2020.
- [6] USMAN, M.U., FARUQUE, M.O. Applications of synchrophasor technologies in power systems. *J. Mod. Power Syst. Clean Energy* 7, 211–226 (2019). <https://doi.org/10.1007/s40565-018-0455-8>.
- [7] J. James and Bindu S., "Hybrid State Estimation including PMU measurements," 2015 International Conference on Control Communication & Computing India (ICCC), Trivandrum, India, 2015, pp. 309-313, doi: 10.1109/ICCC.2015.7432911.
- [8] A. Jain and N. R. Shivakumar, "Power system tracking and dynamic state estimation," 2009 IEEE/PES Power Systems Conference and Exposition, Seattle, WA, USA, 2009, pp. 1-8, doi: 10.1109/PSCE.2009.4840192.
- [9] P. Puviya and N. Priyadarshini, "State estimation in power system using weighted least squares method," 2017 International Conference on Innovations in Information, Embedded and Communication Systems (ICIIECS), Coimbatore, India, 2017, pp. 1-6, doi: 10.1109/ICIIECS.2017.8276038.