

ESTUDIO DE PÉRDIDAS TÉCNICAS A TRAVÉS DE UNA TÉCNICA DE ESTIMACIÓN DE ESTADO EN SISTEMAS DE DISTRIBUCIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA UTILIZANDO LOS DATOS DE FACTURACIÓN DE LOS USUARIOS

Andrés A. Rojas Q. ^{1,2*} Paulo De Oliveira-De Jesus ^{1,2*}

¹Instituto de Energía de la Universidad Simón Bolívar

²Universidad Simón Bolívar, Departamento de Conversión y Transporte de Energía

* arojasq@usb.ve; pdeoliveira@usb.ve

RESUMEN

En este trabajo se presenta una metodología para la estimación de las pérdidas técnicas de energía de una red eléctrica de distribución. Esta herramienta ha sido desarrollada en el contexto del proyecto "PYSYST - Desarrollo de una Herramienta Computacional en Código Abierto para Estudios del Sistema Eléctrico Nacional" financiado por el FONACIT-MPPCTII. Este método permite la evaluación de la eficiencia energética de la red (estudio de pérdidas) utilizando una técnica de Estimación de Estado en Sistemas de Distribución de Energía Eléctrica (EESDEE). El método utiliza como insumo las medidas de corriente y tensión en el circuito principal en condición de demanda máxima de la subestación, y como pseudomedidas los registros de energía ó facturación (kwh/mes) agregados y el factor de carga de los usuarios en aquellos nodos de la red en los cuales se disponga de la relación cliente - transformador. La metodología es aplicada a título de ejemplo a una red de 4 nodos de prueba. Se realiza una comparación numérica entre un estudio de pérdidas estándar y luego mediante la aplicación de técnica de EESDEE. Esta técnica permite realizar una estimación de pérdidas técnicas y el grado de eficiencia de la red sin necesidad de realizar una campaña de medición exhaustiva.

Palabras Clave: Estimación de estado, mínimos cuadrados, observabilidad, ahorro de energía, pérdidas técnicas

INTRODUCCIÓN

La operación y planificación eficiente de una red de distribución requiere de aplicaciones matemáticas computacionales, como por ejemplo estimación de estado, flujo de carga óptimo, reconfiguración óptima de la red, entre otras. Con una herramienta, como por ejemplo EESDEE, es posible a partir de las medidas en tiempo real (provenientes del sistema SCADA-DMS) y de los registros históricos de energía mensual facturada de los usuarios, conocer con mayor exactitud las variables de estado estimadas de la red. Una vez que se conocen estas variables, se procede a realizar estudios de pérdidas técnicas, balances de potencia, eficiencia energética del sistema, entre otros.

Entre las técnicas de EE presentadas en la literatura, basadas en un modelo de ecuaciones de potencias nodales inyectadas, y aplicables a sistemas de distribución en un equivalente de secuencia positiva y trifásico se tienen [3], [4], [5], [6], [7]. Una revisión extensa de las metodologías de EESDEE, basada en modelos determinánticos, difusos y probabilísticos se encuentra en [1]

La metodología con la cual se desarrolla este trabajo se divide en dos partes: En la primera se explica de manera general la formulación del problema de EESDEE según [1]; [8] y en la segunda

parte se presenta el cálculo de la η luego de la aplicación de técnica de EESDEE basada en la teoría de mínimos cuadrados ponderados

METODOLOGÍA

Parte 1: Explicación del problema de EESDEE

El problema de EESDEE consiste en un problema de optimización no lineal sujeto a un conjunto de restricciones, las cuales conforman el modelo matemático de la red. De manera general, el problema se plantea como:

$$\min F(x)$$

Sujeto a:

$$R(x) = 0$$

La función objetivo $F(x)$ es el error cuadrático ponderado entre un vector de mediciones y/o pseudomediciones y su valor estimado compuesto por las variables de estado que definen el modelo de la red. Las restricciones $R(x) = 0$ son las ecuaciones que constituyen el modelo matemático de la red, las cuales se basan en la aplicación de las Leyes de Kirchoff ó las ecuaciones de potencias inyectadas nodales.

Según la referencia (tesis de maestría) el problema de EESDEE, en base al modelo de ecuaciones matriciales que vinculan las corrientes en función de las potencias activas y reactivas nodales inyectadas (referencia TRX) desarrollado, es el siguiente:

$$\min \frac{1}{2(\psi - g(x))} \omega(\psi - g(x))^T \quad (1)$$

Sujeto a:

$$\begin{bmatrix} V_x \\ V_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_{x-0} \\ V_{y-0} \end{bmatrix} + TRX \begin{bmatrix} I_x \\ I_y \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$I_x = -T \cdot I_x \quad (3)$$

$$I_y = -T \cdot I_y \quad (4)$$

En donde

ψ : Es el vector de mediciones y pseudomediciones

x : Es el vector de variables de estado

$g(x)$: Es el vector de medidas estimadas en función de las variables de estado, conforme a un modelo matemático de la red

ω : Son los pesos que se asignan a cada uno de los elementos que componen el vector ψ

V_x : Es el vector de variables de estado en su componente real. Su escritura vectorial es la siguiente:

$$V_x = [V_{x-1} \quad \dots \quad V_{x-i} \quad \dots \quad V_{x-n}] \quad (5)$$

V_y : Es el vector de variables de estado en su componente en cuadratura. Su escritura vectorial es la siguiente:

$$V_y = [V_{y-1} \quad \dots \quad V_{y-i} \quad \dots \quad V_{y-n}] \quad (6)$$

V_{x-0} : Es la componente real de la barra *slack*

V_{y-0} : Es la componente en cuadratura de la barra *slack*

I_x : Es el vector de corrientes inyectadas en su componente real. Su escritura vectorial es la siguiente:

$$I_x = [I_{x-1} \quad \dots \quad I_{x-i} \quad \dots \quad I_{x-n}] \quad (7)$$

I_y : Es el vector de corrientes inyectadas en su componente en cuadratura. Su escritura vectorial es la siguiente:

$$I_y = [I_{y-1} \quad \dots \quad I_{y-i} \quad \dots \quad I_{y-n}] \quad (8)$$

J_x : Es el vector de corrientes de rama en su componente real. Su escritura vectorial es la siguiente:

$$J_x = [J_{x-01} \quad \dots \quad J_{x-(i-1)i} \quad \dots \quad J_{x-(n-1)n}] \quad (9)$$

J_y : Es el vector de corrientes de rama en su componente en cuadratura. Su escritura vectorial es la siguiente:

$$J_y = [J_{y-01} \quad \dots \quad J_{y-(i-1)i} \quad \dots \quad J_{y-(n-1)n}] \quad (10)$$

T : Es una matriz de conectividad de la red (un mayor detalle se su construcción se presenta en (TRX-P))

TRX : Es una matriz que relaciona conectividad de la red, en conjunto a sus parámetros pasivos (un mayor detalle se su composición se presenta en [9])

El vector de medidas ψ (datos de entrada para el algoritmo de EE) se compone a su vez de los siguientes términos:

$$\psi = [|V^m| \ |U^m| \ fp_{01}^m \ W^m \ fp^m] \quad (11)$$

En donde:

$|V^m|$: Es el vector de módulos de tensiones medidas proveniente del sistema SCADA - DMS.. Este se conforma de la medida de tensión (para un modelo de secuencia positiva – monofásico) en la barra principal de un circuito de la SED También incluye las tensiones de dispositivos, como por ejemplo reconectores, ubicados en diferentes sectores del circuito. Su escritura vectorial es la siguiente:

$$|V^m| = [|V_0^m| \dots |V_i^m| \dots |V_n^m|] \quad (12)$$

$|U^m|$: Es el vector de módulos de corrientes de rama proveniente del sistema SCADA - DMS.. Este se conforma de la medida de corriente de rama del circuito principal de la SED. También incluye las medidas de dispositivos de protección, como por ejemplo reconectores, ubicados en diferentes tramos del circuito. Su escritura vectorial es la siguiente:

$$|U^m| = [|U_{01}^m| \dots |U_{ij}^m| \dots |U_{(n-1)n}^m|] \quad (13)$$

fp_{01}^m : Es el factor de potencia en el circuito principal de la SED

W^m : Son las pseudomedidas de energía (kWh/mes) de los usuarios agregados mediante un procesamiento estadístico hasta el punto de transformación. Su escritura vectorial es la siguiente:

$$|W^m| = [|W_1^m| \dots |W_i^m| \dots |W_n^m|] \quad (14)$$

fp^m : Es el factor de potencia en el punto de transformación. También es un dato obtenido tras un procesamiento estadístico de agregación de la energía de los usuarios hasta el punto de transformación

Los vectores de corrientes I_x e I_y (demostración completa en [1]) en la restricción de la ecuación (2) que componen al problema de optimización (1), se formulan en función de las variables de estado V_x y V_y ; y de las energías y factores de potencia nodales de la siguiente manera:

$$I_x = W_i \frac{V_{x-i} + V_{y-i} \cdot \tan(\cos^{-1} fp_i)}{720 \cdot Fc_i (V_x^2 + V_y^2)} \quad (15)$$

$$I_y = W_i \frac{-V_{x-i} \tan(\cos^{-1} fp_i) + V_{y-i}}{720 \cdot F_{c_i} (V_x^2 + V_y^2)} \quad (16)$$

En las ecuaciones (15) y (16) F_{c_i} representa el factor de carga del nodo, y su valor proviene de estudios estadísticos de agregación de curvas de carga (en este trabajo se asume con valor unitario).

El vector de medidas estimadas $g(x)$ (datos de salida del EE) se compone a su vez de los siguientes términos:

$$g(x) = [V \quad |V| \quad fp_{01} \quad W \quad fp] \quad (17)$$

En donde:

V: Es el vector de módulos de medidas de tensión estimadas en los nodos del circuito (incluida la barra *slack* de la SED).

|V|: Es el vector de módulos de medidas de corrientes de rama en tramos del circuito (incluido la línea de salida en la SED)

fp₀₁: Es el factor de potencia estimado del circuito principal

W: Es el vector de pseudomedidas de energía agregada estimada en los nodos del circuito

fp: Es el factor de potencia estimado en los nodos del circuito

Parte 2: Procedimiento para el cálculo de η

Una vez obtenido el vector de mediciones estimadas $g(x)$, se procede al cálculo de la η por medio del siguiente diagrama de flujo:

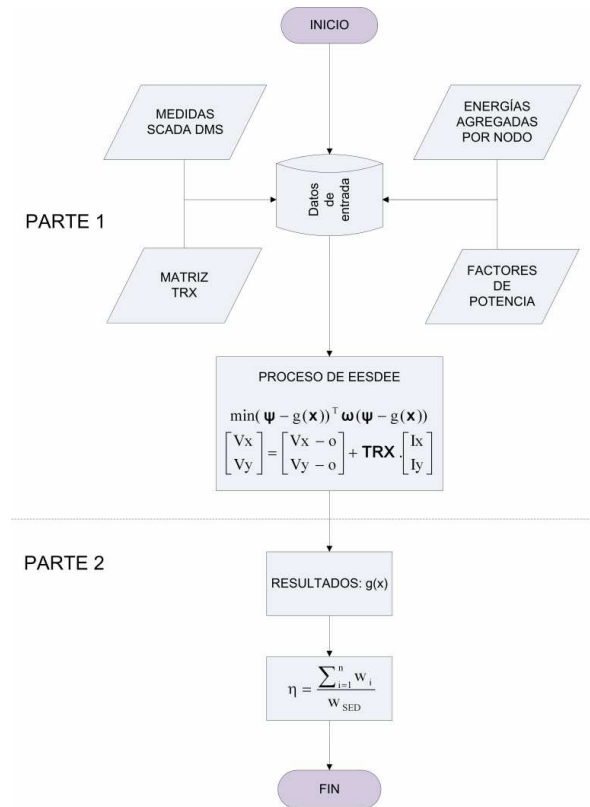


Figura 1: Esquema de cálculo de η por medio de EESDEE

El cálculo η se realiza de la siguiente manera:

$$\eta = \frac{\sum_{i=1}^n W_i}{W_{SED}} \quad (18)$$

En donde:

W_i : Son las energías agregadas estimadas para cada nodo de la red en donde se disponga de la relación cliente transformador (sumideros)

W_{SED} : Es la energía entregada por la SED (fuente)

De esta manera, mediante la aplicación del algoritmo de EESDEE se procede a calcular la eficiencia estimada del circuito de distribución, en donde en el numerador de la ecuación (18) se tiene la sumatoria de todas las energías agregadas estimadas en los nodos de la red en los cuales se disponga de la relación cliente transformador, y en el denominador se tiene la energía entregada por la SED, obtenida a su vez con los valores estimados (en condición de demanda máxima) de módulo de tensión, corriente de rama y factor de potencia en el circuito principal. Es decir:

$$W_{SED} = |V_0| \cdot |V_{01}| \cdot f_{p01} \cdot T^{max} \quad (19)$$

En donde:

T^{max} : es el tiempo máximo; en este caso $T^{max} = \frac{720h}{mes} Fc$. Siendo Fc el factor de carga mensual del circuito (dato extraído de las curvas de demanda en el sistema SCADA-DMS)

RESULTADOS

La metodología es aplicada a una red de 4 nodos [2], ver Figura 2:

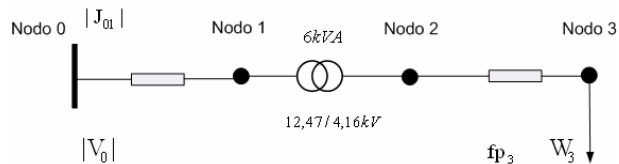


Figura 2: Red IEEE de 4 nodos

Las bases para los cálculos en p.u son: $S_{base} = 6 \text{ MVA}$; y las tensiones en ambos lados del transformador con valores 12,47 y 4,16 kV respectivamente.

La matriz TRX (con valores en p.u.) está compuesta por los siguientes términos:

$$TRX = \begin{bmatrix} A & -B \\ B & A \end{bmatrix} \quad (20)$$

Donde:

$$A = \begin{bmatrix} 0.0045 & 0.0045 & 0.0045 \\ 0.0045 & 0.0145 & 0.0145 \\ 0.0045 & 0.0145 & 0.0647 \end{bmatrix}; \quad B = \begin{bmatrix} -0.0092 & -0.0092 & -0.0092 \\ -0.0092 & -0.0692 & -0.0692 \\ -0.0092 & -0.0692 & -0.1721 \end{bmatrix} \quad (21) \text{ y } (22)$$

Las medidas que componen el vector ψ son las siguientes:

$$\psi = \begin{bmatrix} |V_0^m| \\ |V_{01}^m| \\ fp_{01}^m \\ W_3^m \\ fp_3^m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 \\ 1.2106 \\ 0.8218 \\ 565.7040 \\ 0.9 \end{bmatrix}$$

W_3^m : Proviene de convertir la potencia activa y reactiva inyectada nodal originales (red IEEE 4 nodos) con valores -0,9 y -0,4359 en p.u. respectivamente en su equivalente energía mensual (considerando un tiempo de 720 h/mes), un factor de carga de 90% y una perturbación de 97% (esto último como ruido estocástico en la medida). El número de variables de estado a estimar es siete; y la dimensión del vector de medidas ψ , en conjunto a las inyecciones de potencias nulas (medidas virtuales) es 9; por tanto se cumple la condición de observabilidad.

Una vez especificados los datos de entrada al algoritmo de EE, los resultados de las variables de estado estimadas y el vector de medidas estimados se muestran en **Tabla 1** y **Tabla 2**

Tabla 1: Variables de estado estimadas

Nodo	kV	Módulo (p.u)	Ángulo (grados)
0	12,4014	0,9945	0
1	12,2590	0,9831	0,3440
2	3,8904	0,9352	-3,5175
3	3,4341	0,8255	-8,6238

Tabla 2: Medidas estimadas

g(x)	Valor (p.u)	Residuo
$ V_0 $	0,9945	0,0055
$ V_{01} $	1,1750	0,0356
$ fP_{01} $	0,8245	0,0027
W_2	565,7107	-0,0067
fP_2	0,9000	0

El cálculo de η_{EE} por medio de las medidas estimadas se realiza de la siguiente manera:

$$\eta_{EE} = \frac{\sum_{i=1}^n W_i}{W_{SED}} = \frac{565,7107}{623,3215} = 0,9061$$

En cambio si el cálculo η se realiza directamente utilizando las medidas y/o pseudomedidas se tiene que:

$$\eta_m = \frac{565,7040}{644,6755} = 0,8775$$

Por tanto existe una diferencia entre η_{EE} y η_m ; debido a que la primera de ellas proviene de la resolución de un problema de optimización no lineal (fundamentada en la teoría de mínimos cuadrados ponderados), es decir EESDEE; y la segunda se calcula de manera directa por medio del uso de las medidas de potencia y energía existentes en las bases de datos, las cuales a su vez contienen errores (estocásticos pertenecientes a distribuciones de probabilidad del tipo normal) relativos a la precisión y/o clase de dichos medidores.

CONCLUSIONES

La eficiencia energética es un indicador que mide la relación energía de entrada – energía de salida de un determinado sistema. En este caso, se ha aplicado este concepto a una red eléctrica de distribución mediante la aplicación de una técnica Estimación de Estado en Sistemas de Distribución de Energía Eléctrica (EESDEE) con el objeto de realizar un estudio de pérdidas técnicas. La metodología de cálculo propuesta en este trabajo técnico demuestra claramente que los estudios de pérdidas técnicas utilizando las variables de estado y medidas estimadas provenientes de la resolución del problema de EESDEE genera resultados mas exactos a las que se obtienen de un cálculo directo a partir de registros de campo con errores inherentes a los contadores y/o hurto de energía. Esto se debe a que la técnica EESDEE estima las pérdidas de energía de la red de forma optima, minimizando los errores de medición sujeto a las restricciones matemáticas que modelan el sistema físico. Esta técnica es un instrumento de bajo costo ya al utilizar la base de datos comercial y al tener conocimiento estadístico del comportamiento de los

usuarios es posible realizar la estimación de pérdidas técnicas y el grado de eficiencia de la red sin necesidad de realizar una campaña de medición costosa y exhaustiva.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido realizado con el apoyo institucional del MPPCTI – FONACIT mediante el Proyecto PEI No 2953: Contrato No.201200092 “PYSYST - Desarrollo de una Herramienta Computacional en Código Abierto para Estudios del Sistema Eléctrico Nacional”

REFERENCIAS

- [1] R. Q. A. A, Estimación de Estado en Sistemas de Distribución utilizando la Energía como Pseudomedida, Venezuela: Universidad Simón Bolívar, 2013.
- [2] I. D. S. A. Subcommittee, «IEEE 4 Node Test Feeder,» IEEE, 2006.
- [3] I. R. a. S. Shahidehpour, «State Estimation of electric power distribution systems in quasi real-time conditions,» *Power Delivery, IEEE Transactions on*, vol. 8, nº 4, pp. 2009-2015, 1993.
- [4] M. a. A. Kelley, «A branch current based state estimation method for distribution systems,» *Power Systems, IEEE Transactions on*, vol. 10, nº 1, pp. 483-491, 1995.
- [5] J. T. a. W.-H. Liu, «Distribution System State Estimation,» *Power Systems, IEEE Transactions on*, vol. 10, nº 1, pp. 229-240, 1995.
- [6] A. S. Meliopoulus, «Multiphase power flow and state estimation for power distribution systems,» *Power Systems, IEEE Transactions on*, vol. 11, pp. 939-946, 1996.
- [7] J.-H. T. W.-M. Liu, «State Estimation for distribution systems with zero injection constraints,» *Power Systems, IEEE Transactions on*, vol. 11, pp. 518-524, 1996.
- [8] D. O. P. Rojas A, «New formulation for ditribution system state estimation,» de *VI Andean Region International Conference, Andescon*, Ecuador, Cuenca, 2012.
- [9] A. M. a. Y. J. De Oliveira. P, «Distribution power flow method based on a real quasi-symmetric matrix,» *Electric Power Systems Research*, vol. 95, pp. 148-159, 2013.

ABREVIATURAS

EESDEE: Estimación de Estado en Sistemas de Distribución de Energía Eléctrica

EE: Estimación de Estado

SED: Subestación eléctrica de distribución

SCADA: Sistema de Supervisión y Control / Supervisory Control Acquisition Data

DMS: Sistema de Gestión de Distribución / Distribution Management System

p.u.: Por unidad

MPPCTI: Ministerio del Poder Popular para Ciencia, Tecnología e Innovación

FONACIT: Fondo Nacional de Ciencia, Tecnología e Innovación

PEI: Programa de Estímulo a la Innovación e Investigación

PY: Python (software libre de programación)

SYST: Sistema (System)

SÍMBOLOS

η : Eficiencia Energética

i: nodo i del circuito

n: número total de nodos en el circuito

kWh/mes: Kilo vatios hora al mes