

ALGORITMO DE LA MATRIZ Z DE BARRA PARA ESTUDIOS DE FLUJO DE POTENCIA EN REDES DE DISTRIBUCIÓN

Alexis Barroso^{1*}

¹*Departamento de Potencia. Escuela de Ingeniería Eléctrica. Facultad de Ingeniería.
Universidad Central de Venezuela*

**alexisbarroso@gmail.com*

RESUMEN

Se presenta una propuesta para el cálculo de flujos de potencia de una red de distribución. Los flujos de carga convencionales como el Newton-Raphson, Gauss-Seidel y desacoplado rápido, efectivos para el análisis de sistemas de potencia a nivel de transmisión, pero que pueden presentar inconvenientes cuando se analizan en ciertos sistemas de distribución, debido a su naturaleza radial y alta relación R/X. La metodología propuesta aprovecha la radialidad de la red, y se basa en la modificación de la Matriz de Admitancia Nodal, que incluye las cargas en forma de admitancia constante. Luego, se implementa un proceso iterativo tipo Jacobi, hasta que alcance la convergencia. El código fue implementado en MATLAB. La validez del método propuesto fue probada sobre las redes de 7 y 28 barras de la IEEE; comparado sus resultados con el programa Neplan y otros algoritmos propuestos por diferentes autores publicados en la IEEE.

Palabras Clave: Redes de distribución, Flujo de carga, red radial, matriz de admitancia, proceso iterativo de Jacobi.

ABSTRACT

A calculation of power flow of a distribution network is developed. Conventional load flow such as the Newton-Raphson, Gauss-Seidel and fast decoupling, effective for the analysis of power systems at the transmission level, but which may present disadvantages when analyzing distribution systems, due to their nature radial and high R/X ratio. The proposed methodology takes advantage of the radiality of the network, and it is based on the modification of the Nodal Admittance Matrix, which includes the loads in the form of constant admittance. Then, an iterative Jacobi-type process is implemented, until it reaches convergence. The code was implemented in MATLAB. The validity of the proposed method was tested on the networks of 7 and 28 bars of the IEEE; compared its results with the Neplan program and other algorithms proposed by different authors published in the IEEE.

Keywords: Distribution networks, load flow, radial network, admittance matrix, Jacobi iterative process.

INTRODUCCIÓN

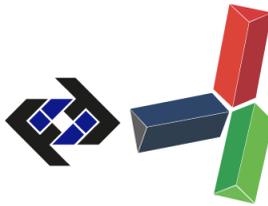
La operación, planificación y estudio de un sistema de distribución de energía eléctrica es de vital importancia en la gestión eléctrica actual. Por lo tanto, se requiere de herramientas confiables para

SECRETARÍA DE LAS JORNADAS.

Coordinación de Investigación .Edif. Física Aplicada. Piso 2. Facultad de Ingeniería.

Universidad Central de Venezuela. Ciudad Universitaria de Caracas. 1053

Telf.: +58 212-605 1644 | <http://www.ing.ucv.ve>



su análisis. Una de las herramientas fundamentales son los estudios flujos de potencia o flujo de carga. Un flujo de potencia es básicamente el cálculo de las condiciones operativas de una red, en régimen permanente o estacionario, para una condición de demanda y generación dadas. Es decir, dada la configuración de un sistema eléctrico de potencia y sus potencias netas en cada nodo, el flujo de potencia o flujo de carga consistirá en hallar las tensiones nodales en régimen permanente. En los sistemas de transmisión se han desarrollado algoritmos muy eficientes, pero que suelen presentar problemas cuando son aplicados a los sistemas de distribución, debido a su naturaleza radial y alta relación R/X (resistencia vs reactancia). Se han reportado una amplia discusión sobre los problemas de convergencia de los métodos tradicionales de flujo de potencia en redes de distribución [1], y se han propuestos diferentes métodos de solución, divididos en tres grupos, a saber: Aquellos que realizan modificaciones a los métodos convencional de Newton-Raphson [2][3], los métodos de barrido (forward and backward sweep), usando las leyes de Kirchhoff [4][5][7] y los métodos de admitancia de barras [6]. Todos ellos son procesos iterativos.

METODOLOGÍA

Dada una topología de un sistema eléctrico y las potencias netas en cada nodo, el flujo de carga consistirá en calcular las variables de estado de dicha red: tensión y ángulo, en régimen permanente. Las inyecciones de potencia activa y reactiva son definidas por las potencias nodales generadas y demandadas. En la figura 1 se presenta una red radial típica, donde se conoce el voltaje de la subestación.

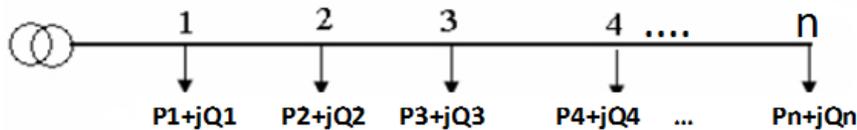


Figura 1. Red radial de distribución.

Entonces, para una barra cualquiera del sistema se puede definir su potencia aparente como:

$$s_{ci} = p_{ci} + jq_{ci} = v_i \cdot i_{ci}^* \quad (1)$$

Donde:

P_{ci} , q_{ci} : potencia activa y reactiva consumida (carga) en la barra i

i_{ci}^* : conjugada de la corriente consumida por la carga en el nodo i

v_i : tensión en la barra i

Por otra parte, la ecuación (1) se puede escribir:

$$s_{ci}^* = p_{ci} - jq_{ci} = v_i^* \cdot i_{ci} \quad (2)$$

Multiplicando el lado izquierdo de la ecuación (2) por el término v_i/v_i :

$$s_{ci}^* = (p_{ci} - jq_{ci}) \frac{v_i}{v_i} = v_i^* \cdot i_{ci} \quad (3)$$

Despejando la corriente consumida por la carga en la barra i , se tiene la siguiente ecuación:

$$i_{ci} = \frac{(p_{ci} - jq_{ci})}{|v_i|^2} v_i \quad (4)$$

Por consiguiente, para cualquier nodo de un sistema de potencia se sabe que la corriente neta inyectada, en función de los términos de admitancia de barra es:

$$i_i = \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n Y_{ij} v_j + Y_{ii} v_i \quad i=1, \dots, n \quad (5)$$

Ahora, si se incluye la carga en la ecuación (5) y mediante kirchhoff de corriente se cumple:

$$i_i = \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n Y_{ij} v_j + Y_{ii} v_i + \frac{(p_{ci} - jq_{ci})}{|v_i|^2} v_i \quad (6)$$

Donde:

Y_{ii} : Sumatoria de todas las admitancias que llegan al nodo i , con su propio signo.

Y_{ij} : Sumatoria de todas las admitancias que existe entre el nodo (i, j)

Para cada barra de carga, conocida como barra tipo PQ, $i_i=0$, por lo que la ecuación (6) quedaría:

$$0 = \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n Y_{ij} v_j + \left[Y_{ii} + \frac{(p_{ci} - jq_{ci})}{|v_i|^2} \right] v_i \quad (7)$$

Para un sistema de distribución se construye el sistema matricial, para cada nodo, a partir de las ecuaciones (6) y (7):

$$[I] = [Y_{bus}][V] \quad (8)$$

Donde:

$[I]$ =Arreglo $n \times 1$ de inyecciones nodales de corriente.

$[Y_{bus}]$ =Matriz $n \times n$ de admitancia nodal del sistema.

$[V]$ =Arreglo $n \times 1$ de tensiones nodales.

Para un sistema radial de $(n-1)$ barras de carga, tipo PQ, considerando carga en la barra 1, sólo existe un punto de alimentación, donde la tensión v_1 es conocida, se tiene:

$$\begin{bmatrix} i_1 \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{11} + \frac{(p_{c1} - jq_{c1})}{|v_1|^2} & \cdots & Y_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ Y_{n1} & \cdots & Y_{nn} + \frac{(p_{cn} - jq_{cn})}{|v_n|^2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_1 \\ v_2 \\ \vdots \\ v_n \end{bmatrix} \quad (9)$$

Ahora se resuelve la ecuación $[V] = [Y_{bus}]^{-1}[I] = [Z_{bus}][I]$

$$\begin{bmatrix} v_1 \\ v_2 \\ \vdots \\ v_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{11} & \cdots & Z_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ Z_{n1} & \cdots & Z_{nn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_1 \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \end{bmatrix} \quad (10)$$

Particularizando para una red radial, donde se conoce el valor de la tensión de la subestación (S/E), para el caso $v_1 = I + j0$, única fuente de alimentación, y desarrollando el producto de matrices se tiene la siguiente sub-matriz:

$$\begin{bmatrix} v_2 \\ v_3 \\ \vdots \\ v_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{22} \\ Z_{33} \\ \vdots \\ Z_{nn} \end{bmatrix} \cdot I_1 \quad (11)$$

Como v_1 es conocido, por lo tanto $I_1 = \frac{v_1}{Z_{11}}$, esta reducción es gracias a las particularidades de una red radial, de allí su ventaja para el análisis en sistemas de distribución de energía eléctrica. En base a lo anterior se programó en un ciclo iterativo tipo Jacobi, comenzando con un perfil de tensiones de arranque para cada barra de $v_i=1+j0$ p.u. y una tolerancia dada 10^{-5} . El algoritmo propuesto puede ser resumido en los siguientes pasos:

- 1-. Leer data del sistema radial de distribución.
- 2-. Construir la Ybus del sistema, matriz de admitancia, con los datos topológicos de la red.
- 3-. Definir las tensiones de arranque y la tolerancia, la tensión de la subestación es conocida.
- 4-. Comenzar las iteraciones formando la matriz (9).
- 5-. Invertir la Ybus nueva para obtener la matriz Zbus.
- 6-. Calcular el sistema (11).
- 7-. Calcular $|V_i^{k+1} - V_i^k| \leq \epsilon$ para $i=2, \dots, n$
- 8-. Si converge la solución ir a 9, si no, ir a 4 con los voltajes actualizados.
- 9-. Imprimir resultados.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Con la ayuda del programa Matlab se implementó el algoritmo en las redes de 7 y 28 barras de la IEEE. Se prueban dos casos que se describen a continuación.

Caso I: IEEE 7 barras; 12,47 kV, Sbase=100 kVA. Los datos de la red se muestran en la tabla 1.

Tabla 1. Datos de red de prueba de 7 barras IEEE.

salida	llegada	r(p.u)	x(p.u)	Pload(p.u)	Qload(p.u)
1	2	0,0265	0,0462	0,1017	0,0635
1	3	0,1005	0,0693	0,0547	0,0342
3	4	0,067	0,0462	0,0809	0,0596
3	5	0,0265	0,0462	0,1017	0,0635
5	6	0,1005	0,0693	0,0547	0,0342
5	7	0,067	0,0462	0,0809	0,0596

Se comparó con otros algoritmos como el TRX [7], que se basa en un método de barrido (forward and backward sweep), el Newton-Raphson y el propuesto en MANPOWER, los resultados se muestran en la tabla 2.

Tabla 2. Voltajes de barra del caso de la red radial de 7 barras IEEE.

Nodos	TRX	M. propuesto	Matpower	Newton-Raphson
1	1,00000	1,00000	1,00000	1,00000
2	0,99432	0,99433	0,99434	0,99433
3	0,94042	0,94075	0,94074	0,94075
4	0,93164	0,93198	0,93197	0,93198
5	0,92559	0,92600	0,92599	0,92600
6	0,91694	0,91742	0,91742	0,91742
7	0,91660	0,91708	0,91708	0,91708

Al comparar los valores se observa es que el método propuesto arroja resultados iguales al método tradicional de Newton-Raphson, la mayor variación se presenta con el método de barrido TRX [7].
 Caso II: IEEE de 28 barras, 11 kV, Sbase= 100 kVA, cuyos datos se muestran en la tabla 3.

Tabla 3. Datos de red de prueba de 28 barras IEEE.

salida	llegada	r(Ω)	x(Ω)	Pload(kW)	Qload(kVAr)
1	2	0.12648	0.05263	140	90
2	3	0.15463	0.06579	80	50
3	4	0.09486	0.03947	80	60
4	5	0.06374	0.02632	100	60
5	6	0.25296	0.10526	80	50
6	7	0.18972	0.07895	90	40
7	8	0.10119	0.04211	90	40
8	9	0.18972	0.07895	80	50
9	10	0.25296	0.10526	90	50
10	11	0.19108	0.05402	80	50
11	12	0.09554	0.02701	80	40
12	13	0.28663	0.08103	90	50
13	14	0.28663	0.05942	70	40
14	15	0.21019	0.05402	70	40
15	16	0.19108	0.08103	70	40
16	17	0.28663	0.05402	60	30
17	18	0.19108	0.05402	60	30
2	19	0.23886	0.06753	70	40
19	20	0.09554	0.02701	50	30
20	21	0.19108	0.05402	50	30
21	22	0.34395	0.09724	40	20
3	23	0.37339	0.07023	50	30
23	24	0.21019	0.05942	50	20
24	25	0.38217	0.10804	60	30
6	26	0.19108	0.05402	40	20
26	27	0.09554	0.02701	40	20
27	28	0.09554	0.02701	40	20

Para este caso se compararon los resultados con un programa comercial para el análisis de sistemas de potencia: NEPLAN y con el método de barrido TRX [7]. Los resultados se presentan en la tabla 4.

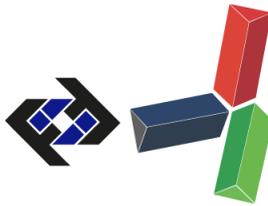


Tabla 4. Voltajes de barra del caso de loa red radial de 28 barras IEEE.

Nodos	M. propuesto	TRX	NEPLAN
1	1,0000	1,0000	1,0000
2	0,9975	0,9975	0,9975
3	0,9950	0,9950	0,9950
4	0,9938	0,9938	0,9938
5	0,9929	0,9930	0,9930
6	0,9900	0,9900	0,9900
7	0,9882	0,9882	0,9882
8	0,9873	0,9873	0,9873
9	0,9858	0,9859	0,9859
10	0,9841	0,9841	0,9841
11	0,9830	0,9830	0,9830
12	0,9825	0,9826	0,9826
13	0,9814	0,9814	0,9814
14	0,9805	0,9805	0,9805
15	0,9800	0,9800	0,9800
16	0,9796	0,9796	0,9796
17	0,9793	0,9793	0,9793
18	0,9792	0,9792	0,9792
19	0,9970	0,9970	0,9970
20	0,9969	0,9969	0,9969
21	0,9967	0,9967	0,9967
22	0,9966	0,9966	0,9966
23	0,9945	0,9945	0,9945
24	0,9943	0,9943	0,9943
25	0,9941	0,9941	0,9941
26	0,9898	0,9898	0,9898
27	0,9897	0,9897	0,9897
28	0,9897	0,9897	0,9897

Al observar los resultados presentados se tiene la mayor variación de 0,0001 p.u. con respecto al método de barrido TRX [7], y con el programa comercial no presenta variación. En el programa comercial se tomó la opción de análisis de sistemas de distribución, ya que también permite elegir si la red es de transmisión.

CONCLUSIONES

Este trabajo presenta una metodología para la solución de flujos de carga en redes de distribución, el cual muestra ser eficiente, además de su simplicidad y de fácil programación. Los resultados fueron validados con un programa comercial. Además, presenta la ventaja que se puede incluir las barras con compensadores.

SECRETARÍA DE LAS JORNADAS.

Coordinación de Investigación .Edif. Física Aplicada. Piso 2. Facultad de Ingeniería.

Universidad Central de Venezuela. Ciudad Universitaria de Caracas. 1053

Telf.: +58 212-605 1644 | <http://www.ing.ucv.ve>

REFERENCIAS

- [1] Iwamoto, S., Tamura, Y. "A Load Flow Calculation Method for ill-Conditioned Power Systems", IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-100, No. 4, pp. 1736-1743, Abr. 1981.
- [2] Zhang, F., Cheng, C. S., "A Modified Newton Method for Radial Distribution System Power Flow Analysis", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 12, No. 1, pp. 389-397, Feb. 1997.
- [4] Teng, J. H., "A Network-Topology Based Three-Phase Load Flow for Distribution Systems", Proc. Natl. Sci. Coun. ROC (A), Vol. 24, No. 4, pp. 259-264, 2000.
- [5] Augugliaro, A., Dusonchet, L., Favuzza, S., Ippolito, M. G., and Sanseverino, E. R., "A New Backward/Forward Method for Solving Radial Distribution Network with PV Nodes", Electrical Power Systems Research, Vol. 78, No. 3, pp. 330-336, Mar. 2008.
- [6] Satyanarayana, S., Ramana, T., Sivanagaraju, S., and Rao, G. K., "An Efficient Load Flow Solution for Radial Distribution Network Including Voltage Dependent Load Models", Electric Power Components and Systems, Vol. 35, No. 5, pp. 539-551, 2007.
- [7] De Oliveira, P. M., "The Distribution TRX-Power Flow Method", Universidad Simón Bolívar, Trabajo de ascenso prof. Titular, 2010.
- [8] Shirmohammadi, D., Hong, H. W., Semlyen, A., Luo, G. X., "A Compensation-Based Power Flow Method for Weakly Meshed Distribution and Transmission Networks", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 3, No. 2, pp. 753-762, May. 1988.
- [9] Ghosh, S., Das, D., "Method for Load-Flow Solution of Radial Distribution Networks", IEEE. Proc. Generation Transmission and Distribution, Vol. 146, No. 6, pp. 641-648, 1996.