Método suma de potencias en Sistemas de Distribución

G. Ivonne Gutiérrez M.*, Manuel J. Villarroel M* y Sergio E. Carter F.*

Los estudios de flujos de carga o de potencia juegan un rol importante en la planificación y operación de Sistemas Eléctricos de Potencia, proporcionando información confiable que garantizan, entre otras, una óptima operación y seguridad del sistema.

Estudios de flujos de carga para grandes Sistemas Interconectados de Potencia se han desarrollado e implementado en computador usando variadas y refinadas técnicas. Sin embargo, para Sistemas de Distribución complejos, la mayoría de las veces de naturaleza radial, estos programas resultan poco adecuados, presentando principalmente, problemas de convergencia y de capacidad de memoria.

En este trabajo se presenta un programa computacional que permite evaluar en forma rápida y eficiente las condiciones de operación de un Sistema de Distribución Radial, determinando los voltajes en los nudos y los flujos de potencia en las líneas para distintas condiciones de carga.

Para la resolución se emplea el Método Suma de Potencias que presenta ventajas importantes sobre métodos tradicionales, tales como Newton Raphson y Gauss-Seidel, en el tratamiento de sistemas de este tipo.

La formulación considera un interesante almacenamiento de las características topológicas de la red en un único vector y la modelación de elementos componentes del Sistema de Distribución, tales como líneas, transformadores (modelación que permite evaluar las pérdidas de potencia en el núcleo), condensadores y cargas, estas últimas como función del voltaje.

La utilización de aritmética real en la totalidad de los cálculos, es una característica atractiva ya que, mediante un tratamiento adecuado, es posible eliminar el ángulo asociado a los fasores de voltaje en los nudos, el que puede ser calculado aparte en forma explícita.

A partir del mismo método se presenta un programa de cálculo no iterativo, que desprecia las pérdidas y considera modelos de carga de potencia constante.

Finalmente se estudian diferentes redes con distinto número de barras, sometidas a variadas condiciones de carga. Los resultados respecto de tiempos de CPU son satisfactorios, incluso en redes fuertemente cargadas y con gran número de barras.

El Programa de Cálculo de Flujos de Potencia que se presenta, no tiene excesivos requerimientos de memoria, es robusto y razonablemente rápido. Estas características permiten que él, constituya una herramienta poderosa en muchos de los estudios aplicados a Sistema Eléctricos de Distribución.

Introducción

La evolución tecnológica de las últimas décadas también se ha manifestado en la forma en que se diseñan y operan los Sistemas de Distribución de Energía Eléctrica. La aplicación de nuevas tecnologías a estos sistemas, ha significado la utilización, entre otras, de técnicas computacionales en la gestión de las Redes de Distribución.

En efecto, uno de los estudios mas frecuentes realizado en Sistemas de Distribución, lo constituye el cálculo de las condiciones en régimen permanente, el cual hasta hace algún tiempo fue realizado utilizando algoritmos de Flujos de Potencia concebidos para su aplicación en Sistemas de Generación y Transmisión, tales como Gauss- Seidel y Newton Raphson.

Las notables diferencias que presentan los Sistemas de Distribución respecto de los de Generación y Transmisión, y las

* Departamento de Ingeniería Eléctrica, Universidad de la Frontera. Fax (56)(45) 252 547 e-mail ivonne@werken .ufro.cl. Casilla 54-D, Temuco, Chile.

tendencias a modernizar los primeros, justifican por demás la implementación de un flujo de carga específico que contemple todas las características inherentes a ellos.

Métodos de flujo de potencia radial

La principal característica de los Métodos de Flujo de Potencia Radial es que hacen uso de la estructura topológica radial del sistema. Los más conocidos son el Método Escalonado, el Método Suma de Corrientes y el Método Suma de Potencias, siendo los más utilizados los dos últimos[4].

Estudios comparativos entre estos tres métodos[1,4,7], informan que para pequeños niveles de carga (menores que la nominal) no se observan diferencias en el número de iteraciones; sin embargo, para cargas mayores (sobre 1,5 veces la nominal) el Método Suma de Potencias se aprecia mas robusto[1]. Adicionalmente el Método Escalonado presenta la desventaja de limitar la profundidad de los subalimentadores del sistema pues cada uno de ellos necesita de subiteraciones.

Por otro lado, al comparar los estudios de Flujos de Carga de los tres métodos antes mencionados y los tradicionales, todos aplicados a Sistemas de Distribución se aprecian las superiores características de convergencia de los primeros[1,4].

Apoyados en estas referencias, en la implementación del presente algoritmo, se escogió el Método Suma de Potencias.

Método suma de potencias

El Método Suma de Potencias es una técnica de Flujos de Potencia Radial en la cual se pueden incorporar todas las características de los Sistemas de Distribución, tales como: radialidad, desbalances, etc[2].

Como el problema de Flujos de Potencia es no lineal, el método de solución aquí expuesto es iterativo.

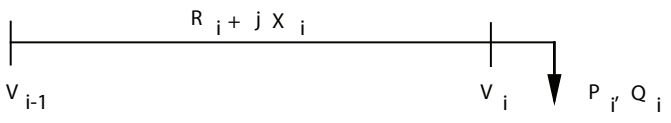


FIGURA 1. Tramo de línea de un alimentador cualquiera

La técnica consiste en dos procesos; el primero, aguas arriba, determina en forma simultánea la potencia equivalente en los nudos y las pérdidas de potencia. El segundo, aguas abajo, determina las tensiones en los nudos a través de una ecuación de cuarto orden para el módulo y una ecuación explícita para el ángulo. Consideremos la Figura 1, para la presentación del método, en donde:

V_{i-1}, V_i : Fasores tensión en el extremo transmisor y receptor del tramo i

P_i, Q_i : Potencias equivalentes activa y reactiva asociadas al nudo i

R_i, X_i : Resistencia y reactancia del tramo i.

β_i : Diferencia angular entre los fasores V_{i-1} y V_i.

La solución propuesta para el Flujo de Carga por este método consiste en resolver para cada rama la siguiente ecuación básica:

$$V_i^4+A_iV_i^2+B_i=0 \quad (1)$$

donde:

$$A_i=2(P_iR_i+Q_iX_i)-V_{i-1}^2 \text{ y}$$
$$B_i=(P_i^2+Q_i^2)(R_i^2+X_i^2).$$

La ecuación 1 tiene una solución directa y, como se observa, no depende del ángulo de fase, el que puede ser calculado a partir de:

$$tg(\beta_i)=(P_iX_i-Q_iR_i)/(P_iR_i+Q_iX_i+V_i^2) \quad (2)$$

Los valores de las potencias equivalentes, tanto activa como reactiva representan toda aquella demandada por la red vista desde el nudo "i" aguas abajo, incluyendo las pérdidas, las que se determinan por:

$$L_{pi}=R_i(P_i^2+Q_i^2)/V_i^2 \quad L_{qi}=X_i(P_i^2+Q_i^2)/V_i^2 \quad (3)$$

La ecuación para determinar los voltajes en los nudos puede considerarse de dos formas, tal como aparece en la expresión 1 en lo que denominaremos Método Completo o bien en forma aproximada, dando origen al Método Simplificado[3]. Este último se basa en el hecho de que las pérdidas de potencias activa y reactiva en una rama "i" cualquiera, son pequeñas comparadas con el flujo de potencia que fluye por dicha rama. Por lo

tanto, las magnitudes de las tensiones en las barras pueden ser determinadas de:

$$V_i^2+A_i=0 \quad (4)$$

Modelación de la red de distribución

La modelación se realiza teniendo en cuenta todos los componentes del sistema, tales como líneas, transformadores, cargas y elementos shunt.

La Red de Distribución se supone trifásica balanceada, lo cual significa que puede ser representada por su equivalente monofásico.

En la modelación de líneas y cables, ambos se representan por su resistencia y reactancia en "tanto por unidad". La susceptancia capacitiva se desprecia, pues se trata de líneas cortas y los niveles de tensión son bajos.

Debido a que los transformadores se presentan en gran número en Sistemas de Distribución y que además contribuyen en forma significativa a las pérdidas en el sistema, en una simulación rigurosa, deben ser considerados. El modelo por fase del transformador considera una impedancia serie (resistencia y reactancia de fuga) y las pérdidas en el núcleo sobre el terminal secundario. Las pérdidas activa y reactiva en el núcleo del transformador pueden ser expresadas en función de la magnitud de la tensión como se indica en las ecuaciones 5 y 6, donde A, B, C, D, E y F son constantes con valores típicos[8].

$$P_{núcleo}(p.u)=KVA_{nominal}/S_B(AV^2+Be^{CV^2}) \quad (5)$$

$$Q_{núcleo}(p.u)=KVA_{nominal}/S_B(DV^2+Ee^{FV^2}) \quad (5)$$

La carga en un Sistema de Distribución no es uniforme. Puede estar formada por diferentes tipos, tales como residencial, comercial, industrial, etc. en porcentajes de incidencia variable[5]. Desde el punto de vista eléctrico, estos consumos no sólo absorben potencia activa (P), sino también una cierta proporción de potencia reactiva (Q) la que depende del tipo de carga y de su factor de potencia. Ambos tipos de potencia dependen, entre otras variables, de la tensión y la frecuencia. Como en el cálculo de flujos de potencia se considera al sistema en operación normal, se obviará la dependencia en frecuencia y se les considerará sólo función de la tensión.

Existen distintas formas de modelar las carga; entre las mas usuales están, la polinomial y la exponencial, este último modelo tiene la ventaja que su incorporación en el programa es simple. El modelo a emplear será entonces el exponencial, para el cual se tiene:

$$S=NC(S_0V^K) \quad (7)$$

donde:

- S : Potencia aparente de la carga en función de la tensión en "tanto por unidad" (º/1)
- V : Módulo de la tensión en la barra de carga en "tanto por unidad"
- S_0 : Potencia aparente nominal de la carga en "tanto por unidad"
- K : Parámetro característico
- NC : Nivel de carga

Este modelo incluye las formas clásicas de representación tales como potencia constante (K=0), corriente constante (K=1) e impedancia constante (K=2). Sin embargo, también se pueden considerar valores experimentales de K[5]. Se incorpora además un coeficiente denominado nivel de carga, el cual permite expresar el consumo como un porcentaje del valor nominal.

Una práctica muy utilizada por las Empresas de Distribución, es agregar condensadores shunt en una o más barras de la red, los que cumplen, preferentemente, dos propósitos: aumentar los niveles de tensión y corregir el factor de potencia. Estos serán modelados en idéntica forma que las cargas, es decir:

$$Q_{sh}=Q_{sh0}V^{K_{sh}} \quad (8)$$

donde :

- Q_{sh} : Potencia reactiva inyectada en la barra en función de la tensión.
- Q_{sh0} : Potencia reactiva nominal inyectada en la barra en "tanto por unidad".
- V : Tensión en la barra en "tanto por unidad"
- K_{sh} : Parámetro característico, específico para este modelo

Descripción de la red de distribución

En la descripción de la Red de Distribución se ha utilizado la nomenclatura de ramas y nudos sugerida por Rajagopalan[6].

Esta nomenclatura asigna a las ramas un número que coincide con el del nudo ubicado al final de la misma (nudo fin). Ello permite la representación de la red por un único vector, lo que se traduce en un gran ahorro en el almacenamiento computacional de ésta. Como una forma de explicar el método se hará la representación indicada en la Tabla 1 para la red de la Figura 2.

Este arreglo permite seguir la red primero aguas arriba partiendo desde los nudos fin y hacia el nudo fuente (subestación), y luego aguas abajo desde el nudo fuente hacia el final de la red. Para la red de la figura 2 los nudos 5, 7, 12, 13, 14, 15 y 16 corresponden a los nudos de término o fin y se reconocen fácilmente porque no aparecen en el vector topología. La ventaja que presenta el empleo de este vector es que permite seguir la red sólo dos veces, una aguas arriba y la otra aguas abajo sin tener que emplear subiteraciones para aquellas líneas con ramificaciones.

Estructura del programa computacional

A partir del Método Suma de Potencias descrito anteriormente, se implementó un algoritmo de cálculo de flujos de potencia, en el cual fueron incluidos todos los modelos de elementos componentes de una Red de Distribución Radial tales como líneas, transformadores, condensadores shunt y cargas.

La ejecución del programa presenta opciones que permiten elegir: El método de solución a emplear, sea éste el completo en el cual se resuelve la ecuación 1 o el simplificado que resuelve la ecuación 4. Si la lectura de datos se hará directamente de pantalla o de un archivo y finalmente es posible seleccionar el criterio de convergencia a utilizar[3]. Posteriormente se procede a la lectura de datos, tales como parámetros, descripción topológica de la red, potencia nominal de carga, potencia reactiva nominal inyectada por los condensadores, parámetros característicos del modelo

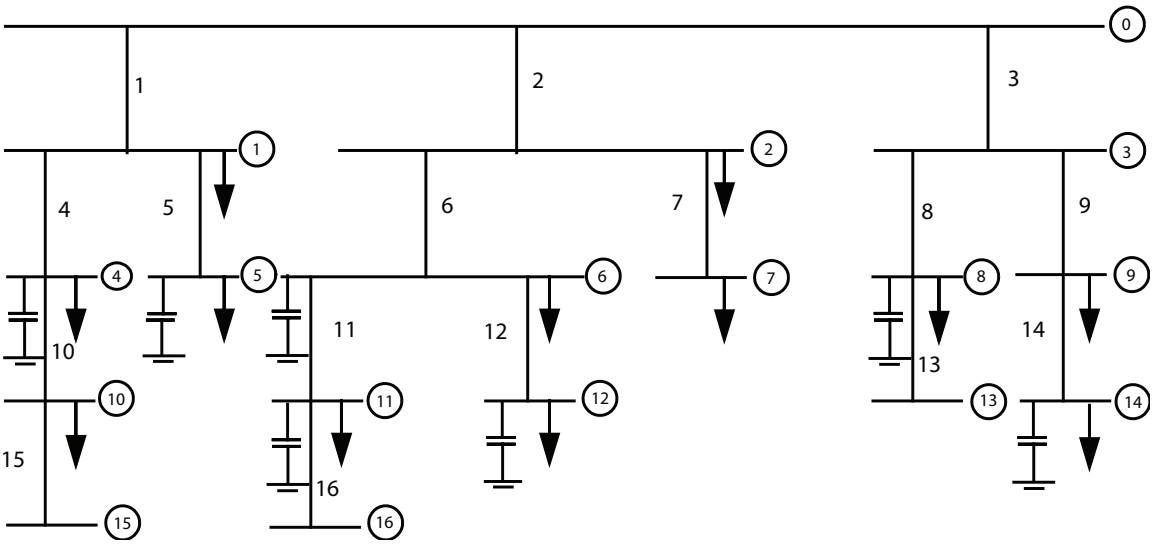


FIGURA 2. Red de distribución radial.

Rama	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
Vector Topología	0	0	0	1	1	2	2	3	3	4	6	6	8	9	10	11

TABLA 1. Vector Topología que describe la red.

exponencial de carga para consumos y condensadores, potencia de transformadores, perfil inicial de tensiones, etc.

Luego de la lectura de datos se pasa al proceso iterativo propiamente tal, el que se puede resumir de la siguiente forma:

1. Determinación de las potencias de las cargas, de los condensadores y pérdidas en los transformadores, para el perfil inicial supuesto.
2. Cálculo simultáneo de pérdidas en las líneas y potencia equivalente en los nudos, en el proceso aguas arriba desde los nudos fin hasta la barra flotante.
3. Determinación de las tensiones en las barras, partiendo del nudo topológicamente posterior al nudo fuente y usando la ecuación 1.
4. Con los nuevos voltajes se recalculan las potencias equivalentes y se utiliza algún criterio de convergencia[3]; si éste no se cumple volver a [1]; de lo contrario determinar los flujos de potencia y otras variables de interés como, por ejemplo, la corriente.

Es importante señalar que el programa permite el estudio del sistema ante distintas condiciones ya sea de nivel de carga, tipos de carga, diferentes tolerancias, variadas partidas para el perfil inicial de tensiones, distintos criterios de convergencia, etc.

Aplicaciones del programa

El programa desarrollado fué aplicado a varias redes radiales; la información referente a datos y resultados se encuentra detallada en la bibliografía[3].

En este trabajo se entregan los resultados de la aplicación del método a una red real de 183 barras. Esta es un alimentador que forma parte de la Red de Distribución de CHILECTRA Metropolitana de Santiago de Chile. Se consideró el modelo de carga de potencia constante(K=0), nivel de carga nominal (NC=1) y convergencia en el módulo de la tensión para una tolerancia de 0,001. El programa convergió en la tercera iteración y los resultados son lo que se señalan en la gráfica adjunta.

Conclusiones

El programa presentado permite hacer un detallado análisis del perfil de tensiones de un alimentador, de las pérdidas de potencia en las líneas, de los flujos de carga y corriente en las ramas .

Además de permitir la obtención de la

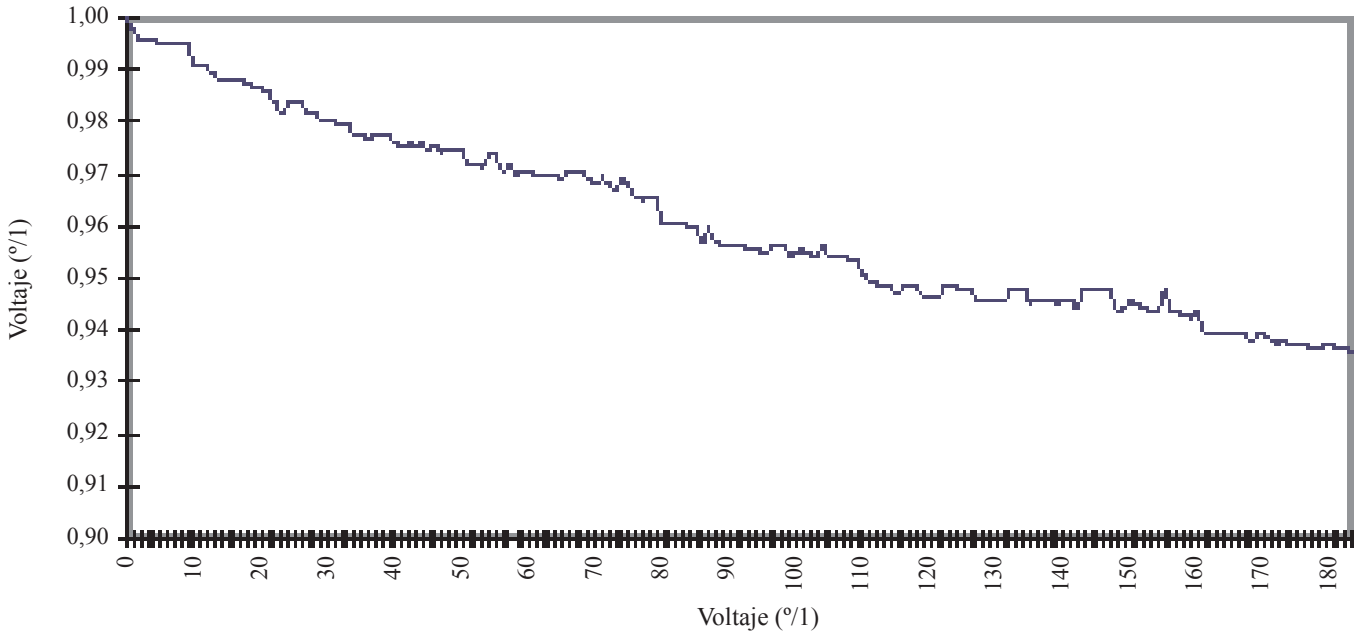


FIGURA 3. Perfil de Tensiones Alimentador 111 CHILECTRA Metropolitana.

solución completa, es factible emplear el método no iterativo que es consecuencia de despreciar las pérdidas del sistema. Este último se muestra como una alternativa viable para estimar con alguna precisión el estado eléctrico en Redes de Distribución Radiales en forma rápida y eficiente.

Entre los aspectos que hacen atractivo el algoritmo está el hecho que la ecuación para la solución del voltaje en las barras, es función sólo de la magnitud de éste, por lo cual para su determinación se hace uso exclusivamente de cantidades reales.

El almacenamiento de la información topológica resulta un aporte valioso, ya que no se recurre a las tradicionales matrices de incidencia para informar respecto de la configuración de la red, sino que se utiliza un único vector con el cual queda completamente descrita esta última.

La convergencia resulta una cualidad muy interesante; en efecto, de los sistemas estudiados todos convergieron, incluso redes con gran número de nudos y fuertemente cargadas[3]. Por ello se pueda asegurar que el programa resulta numéricamente robusto.

Respecto de los requerimientos de memoria y rapidez del programa, los primeros no son significativos, ya que el programa ejecutable y los archivos de datos son transportables sin problema a un disco de 360 Kbytes. Lo segundo resulta bastante satisfactorio aunque queda sujeto a otras variables tales como el tamaño de la red.

En definitiva, el algoritmo que aquí se presenta, no tiene excesivos requerimientos de memoria, es robusto y rápido, constituyendo una herramienta poderosa en muchos de los estudios aplicados a Sistemas Eléctricos de Distribución.

Referencias

1. Broadwater R.P., Chandrasekaran A., Huddleston C.T., Khan A.H. “Power Flow Analysis of Unbalanced Multiphase Radial Distribution Systems” *Electric Power Systems Research Journal*. Vol 14 1988, pp.23-33.

2. Céspedes Renato “New Method for the Analysis of Distribution Networks” . *Trans. on Power Delivery*. Vol.5 Nº1. January 1990, pp. 391-396.

3. Gutiérrez Ivonne “Cálculo de Flujos de Potencia para Sistemas de Distribución Radial” *Tesis Ingeniero Civil*, Universidad de Santiago de Chile 1991.

4. Khan A.H., Broadwater R.P. y Chandrasekaran A. “A Comparative Study of Three Radial Power Flow Methods” *Proceedings of the IASTED International Symposium, High Technology in the Power Industry* Arizona . March 1988, pp. 262-265.

5. Palma A., Sanhueza H., Arias M. y Urbina J. “Determinación Experimental de Parámetros de Carga y su Empleo en Estudios de Flujos de Potencia en Sistemas de Distribución” *Anales IX Congreso Chileno de Ingeniería Eléctrica*, Arica, Octubre 1991, pp. 2.5.1-2.5.6.

6. Rajagopalan S. “A New Computational Algorithm for Load Flow Study of Radial Distribution” *System Comput. and Elect. Eng*. Vol. 5, Great Britain 1978, pp. 225-230.

7. Shirmohammadi D., Hong H.W.,Semlyen A. y Luo G. X. “ A Compensation-Based Power Flow Method for Weakly Meshed Distibution and Transmission Networks” *IEEE Trans. on Power Systems*, Vol. 3, Nº2, May 1988, pp. 753-762.

8. Sun D.I.H., Abe S., Shoults R.R., Chen M.S., Eichenberger P. y Farris D. “Calculation of Energy Losses in a Distribution System” *IEEE Transactions on PAS*, Vol.PAS-99, Nº4 July/Aug 1980, pp. 1347-1356.