



Sistema para cálculos en redes de distribución primaria

Leonardo Casas
Jorge Adrián Leyva

Recibido: Septiembre del 2004
Aprobado: Noviembre del 2004

Resumen / Abstract

Tradicionalmente, los cálculos relacionados con las redes de distribución se apoyan en numerosas aproximaciones debido fundamentalmente a la dificultad de obtener datos confiables y a las simplificaciones hechas para realizarlos. En este artículo se valora la representación de cada elemento de estos circuitos con el fin de obtener respuestas lo más exactas posible en los estudios de los circuitos de distribución primaria. Basado en las ideas expuestas para reducir al mínimo las simplificaciones, se ha desarrollado RADIAL, un sistema de computación que garantiza alta fiabilidad, con el cual es posible alcanzar resultados de alta calidad vinculados con los problemas más frecuentes, con un mínimo de simplificaciones, además, RADIAL ofrece facilidades adicionales para el análisis de problemas reales.

Palabras clave: microcontroladores, energía eólica, electrónica de potencia

Historically calculations related to distribution networks involve many approximations due mainly to the difficulty in obtaining reliable data, and because simplification is always present in order to reduce complex calculations. In this paper each element of these circuits is evaluated in order to obtain as accurate results as are possible in primary distribution circuit studies. With the stated idea to reduce simplifications, RADIAL has been developed as a highly reliable computer system, which makes it possible to obtain high quality results tied to the most problems with minimum simplifications.

Complementary, RADIAL offers many other expanded capabilities with which to analyze existing problems in real circuits.

Key words: microcontroller, eolic energy, power electronic

INTRODUCCIÓN

Los cálculos en ingeniería y de forma particular en las redes eléctricas están expuestos a imprecisiones o errores por dos causas fundamentales: la exactitud del modelo que se representa, y la precisión de los datos que se emplean. Tradicionalmente se ha aceptado un cierto margen de error que en la mayoría de los casos resulta sumamente difícil, y a veces imposible de acotar; sin embargo, cada día se hace más exigente la calidad de la respuesta de un estudio o un análisis dado, fundamentalmente donde la existencia de sofisticados equipos que permiten la obtención de información en tiempo real, cada vez

más frecuentes, elevan el rigor de los estudios y evaluaciones de los elementos y sistemas que se estudian, como sucede en las redes de distribución primaria y de subtransmisión.

Históricamente para afrontar estos estudios se buscaba la simplificación de los complejos cálculos asociados con los problemas de las redes eléctricas; posteriormente, con el empleo de las computadoras esta característica dejó de ser una razón de peso, no obstante, han permanecido algunos criterios sobre la base de simplificaciones y suposiciones que en rigor, en la actualidad, no tienen razón de existir.

En este artículo se hace una valoración de las principales aproximaciones asociadas con los cálculos de una red, así como la forma en que las mismas quedan subsanadas en el sistema RADIAL, concebido para el análisis de redes de distribución primaria y de subtransmisión. Los análisis se enfocan hacia el comportamiento de los principales elementos de estos circuitos: cargas, bancos de transformadores, líneas y capacitores, así como hacia los métodos de cálculo de voltajes y pérdidas de potencia y energía.

MODELACIÓN DE LOS ELEMENTOS

Cargas

Las cargas de los circuitos primarios están directamente vinculadas a los consumidores y se caracterizan por los siguientes parámetros:

- Demanda de potencia activa y reactiva con un comportamiento horario característico en función del servicio que prestan.¹
- Comportamiento de la demanda en función de la representación que se hace de la misma según la siguiente expresión:

$$P + jQ = (P_o + jQ_o) \cdot (V/V_n)^e \quad \dots (1)$$

donde :

$P + jQ$: Demanda de potencia activa y reactiva.

$P_o + jQ_o$: Demanda al voltaje nominal.

V_n : Voltaje nominal.

V : Voltaje real.

e : Exponente para la representación de las cargas. 0 para potencia constante, 1 para corriente constante, 2 para impedancia constante. Si el circuito opera con ligeras caídas de voltaje, los resultados en estas representaciones son similares pero en el caso de situaciones críticas de voltaje, existe una notoria diferencia que se manifiesta fundamentalmente en los cálculos de las pérdidas en líneas y transformadores.

- Cargas monofásicas y trifásicas en el mismo banco de transformadores, las que generalmente operan con diferentes valores de factor de potencia y con una distribución propia entre los transformadores y las fases asociadas a los mismos. Este hecho es la principal causa de desbalance en los circuitos primarios.

Transformadores

Algunos métodos de cálculo de redes de distribución omiten la evaluación de los bancos transformadores asociados a las cargas, en tanto que otros los consideran simétricos. En la realidad de los circuitos de distribución primaria, los bancos de transformadores están formados por unidades monofásicas de uno, dos o tres transformadores convenientemente interconectados para brindar diferentes tipos de servicios.²

El tipo de conexión y la carga asociada determinan el comportamiento de los transformadores (pérdidas de potencia y energía y voltajes por secundario) y las corrientes por las fases lo que a su vez influye sobre el estado de balance de las líneas.

En la práctica existen transformadores de distribución con voltajes por primario con valores de voltaje de fase o de línea, lo que da origen a una gran variedad de conexiones típicas con sus correspondientes comportamientos.

Entre las conexiones más comunes se encuentran:

- Transformadores aislados conectados entre fase y neutro o entre líneas.
- Bancos de dos transformadores con conexión estrella abierta o delta abierta por primario y delta abierta por secundario.
- Bancos de tres transformadores, entre los que son de uso más frecuente las conexiones: estrella/delta, delta/delta y estrella/estrella.

Líneas

Las líneas de los circuitos de distribución primaria descansan sobre crucetas horizontales, y en los casos en que no es así, los conductores se sitúan sobre los vértices de triángulos irregulares, dando como resultado determinado grado de asimetría que deja sentir su influencia en los voltajes de las fases.

La asimetría de las líneas en la práctica no es de gran significación debido al corto recorrido de estos circuitos y los analistas generalmente no toman en consideración este hecho por lo que es frecuente encontrar la representación de las líneas por una impedancia igual para cada fase, que para una frecuencia de 60 Hz está dada por:

$$Z = R + jX \quad \dots (2)$$

donde:

$$X = 0,1738 \log D_{eq}/r' \quad \Omega/\text{km} \quad \dots (3)$$

Sin embargo, el hecho de considerar el desbalance de las corrientes por las fases a la hora de calcular los voltajes permite, a la vez, incluir la asimetría constructiva de las líneas al emplear la ecuación.

$$\begin{bmatrix} \Delta V_a \\ \Delta V_b \\ \Delta V_c \\ \Delta V_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{aa} & Z_{ab} & Z_{ac} & Z_{an} \\ Z_{ba} & Z_{bb} & Z_{bc} & Z_{bn} \\ Z_{ca} & Z_{cb} & Z_{cc} & Z_{cn} \\ Z_{na} & Z_{nb} & Z_{nc} & Z_{nn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \\ I_n \end{bmatrix} \quad \dots (4)$$

que en forma simplificada resulta $[\Delta V] = [Z] \cdot [I]$ con lo cual se hace una valoración tanto de la influencia de la asimetría de las líneas como del desbalance de las corrientes por las líneas.

Capacitores

La práctica más común en la aplicación de los capacitores ha sido buscar una ubicación óptima para provocar la máxima reducción de pérdidas de potencia a la hora de máxima demanda, lo cual se obtiene mediante

$$\frac{\partial \Delta P}{\partial I_c} = 0 \quad \dots(5)$$

en que :

$$\Delta P = \int_0^L [i(l) - I_c]^2 dl + \int_{I_c}^L [i(l)]^2 dl \quad \dots(6)$$

donde:

ΔP : Pérdidas de potencia provocadas por la circulación de la corriente reactiva.

$i(l)$: Distribución de la corriente reactiva a lo largo del circuito.

I_c : Corriente del capacitor.

I_c : Lugar de ubicación del capacitor

L : Longitud total del circuito.

Aunque (6) está formulada considerando una distribución continua de la corriente, y líneas con calibres de conductores uniformes, las conclusiones que se obtienen de ellas son válidas para las condiciones reales de los circuitos.³

La evaluación del ahorro de energía en las líneas debido a la acción de la corriente capacitiva se calcula mediante la ecuación:⁴

$$Ahorro = T \cdot \sum_{i=1}^n R_i \cdot (2 \cdot I_c \cdot I_{máxi} \cdot FC - I_c^2) \quad \dots(7)$$

donde :

T : Tiempo en el que se evalúan las pérdidas de energía.

R_i : Resistencia de la línea en la sección i .

$I_{máx}$: Corriente reactiva máxima en la sección i .

FC : Factor de carga del gráfico de potencia reactiva

n : número de secciones de la línea desde la subestación hasta I_c .

Si como se indicó anteriormente, la ubicación de los capacitores se ha realizado mediante las ecuaciones

(5) y (6), el ahorro de energía se corresponde con la ubicación para máxima reducción de pérdidas de potencia. Para buscar el máximo ahorro de energía es preciso hacer la ubicación óptima de los capacitores de acuerdo con las siguientes ecuaciones.

$$\frac{\partial \Delta E}{\partial I_c} = 0 \quad \dots(8)$$

donde :

$$\Delta E = \int_0^{I_c} \int_0^T [i(l,t) - I_c]^2 \cdot dt dl + \int_{I_c}^L \int_0^T [i(l,t)]^2 \cdot dt dl \quad \dots(9)$$

donde :

ΔE : Pérdidas de energía durante el intervalo de tiempo T .

$i(l,t)$: Distribución de la corriente reactiva a lo largo del circuito durante el intervalo de tiempo.

En este caso es válida la aplicación de la ecuación (7), cuya única diferencia radica en el valor de I_c , que ahora suele ser menor que en el caso en que se realiza la ubicación óptima buscando la máxima reducción de pérdidas de potencia. Como se conoce el gráfico de carga en cada tramo o sección del circuito, al aplicar (7) se utiliza el valor de FC de cada tramo y no un valor general para todo el circuito, lo que asegura mayor exactitud en los resultados. En todos los casos los capacitores se representan por impedancias constantes.

MEDICIONES

Para atenuar el inconveniente que surge ante la imposibilidad de conocer el estado real del circuito,⁵⁻⁷ se emplea un algoritmo de distribución de la carga total medida en la subestación (cargas más pérdidas), que se basa en la definición previa de cada carga por su gráfico y su demanda máxima. Los aspectos fundamentales de este algoritmo se resumen en:

1. Caracterización cuidadosa del servicio que presta cada banco de transformadores (gráfico y demanda máxima).
2. Asignación de valores iniciales de pérdidas de potencia iguales a cero.

$$\Delta P_j = \Delta Q_j = 0 \quad \dots(10)$$

donde

j : Tramo de línea o sección del circuito.

3. Determinación de la potencia total estimada del circuito $P_E + jQ_E$ como la suma de las potencias estimadas para cada nodo j a cada hora i

$$P_E + jQ_E = \sum_{j=1}^k (P_{ji} + jQ_{ji}) \quad \dots (11)$$

donde
 k : Número de nodos.

4. Cálculo de la diferencia entre la potencia obtenida mediante la medición real $P_R + jQ_R$ (menos las pérdidas) y la potencia estimada de las cargas.

$$Dif_P = [P_R - \Delta P_{ij}] - P_E \quad \dots (12)$$

$$Dif_Q = [Q_R - \Delta Q_{ij}] - Q_E \quad \dots (13)$$

5. Ajuste de la demanda de cada nodo j a cada hora i de una forma proporcional a la diferencia detectada.

$$P'_{ji} = P_{ji} + [Dif_P] \frac{P_{ji}}{\sum_{j=1}^k P_{ji}}$$

$$Q'_{ji} = Q_{ji} + [Dif_Q] \frac{Q_{ji}}{\sum_{j=1}^k Q_{ji}} \quad \dots (14)$$

6. Se corre de nuevo el flujo de carga con lo cual se determinan las pérdidas.

7. Se determina la potencia neta de las cargas como la diferencia entre la medición de la subestación y las pérdidas calculadas. Se chequea la diferencia entre los valores netos de la iteración actual y la anterior y se regresa a 3 si la diferencia es mayor que el error antes establecido.

SOFTWARE RADIAL

Las posibilidades que ofrecen las computadoras personales, en la actualidad, estimulan la realización de estudios y análisis cada vez más precisos al evaluar las redes eléctricas de distribución, para lo cual se han tenido que desarrollar sistemas de cómputo con características mucho más potentes que los que existían cuando se realizaban análisis más simples. El sistema RADIAL es el resultado de un proceso de perfeccionamiento de las principales actividades de cálculo donde se han excluido la mayor parte de las simplificaciones existentes en la mayoría de los sistemas precedentes.

El sistema RADIAL está concebido para el estudio de circuitos radiales de distribución primaria o subtransmisión o para el análisis de áreas o zonas (varios circuitos) donde se realizan intercambios de carga o se modifican los puntos de alimentación de los circuitos, para lo cual se efectúan diversos cálculos con diferentes opciones a partir de la información propia de cada problema. Sus características más importantes son:

Datos

La información básica del sistema está dividida en tres grupos de datos fundamentales: los datos de los parámetros, los datos operativos y los de los circuitos.

Parámetros de los circuitos

Comprende toda la información básica de los circuitos (disponible en bibliotecas), la que se ofrece por defecto y puede ser modificada por el usuario. Los principales datos son:

- Conductores de Cu, Al con todas sus características.
- Estructuras donde se sustentan las líneas con sus dimensiones.
- Transformadores trifásicos y monofásicos con todas sus características.
- Gráficos horarios de las demandas de potencia activa y reactiva (residencial, industrial, etcétera).

Datos operativos

- Voltaje nominal y de operación

Datos del circuito

El sistema simula un editor gráfico que permite dibujar la configuración del circuito donde se le incorporan los datos del problema particular que se estudia:

- Líneas o tramos (número de fases, calibre, tipo de conductor, estructura y longitud).
- Cargas (conexión del banco de transformadores, demanda máxima de potencia activa y reactiva y porcentaje de carga monofásica y trifásica en los casos que proceda).
- Capacitores (representados por reactancia constante)
- Fusibles y demás desconectivos
- Generadores con gráficos horarios de potencia activa y reactiva (para los estudios de cogeneración).

Cálculos

Los cálculos que efectúa el sistema son los siguientes:

- Flujo de potencia para estados balanceados y desbalanceados para cualquier hora del día, donde a su vez se determinan las pérdidas de potencia y energía en líneas y transformadores.
- Capacitores: ubicación óptima de bancos dados o selección de bancos trifásicos a partir de unidades

monofásicas (vasos) para máxima reducción de pérdidas de potencia en el horario de máxima demanda o para máxima reducción de pérdidas de energía durante el día. Se acompaña la valoración económica.

- Protección y coordinación: selección de los fusibles de los transformadores de distribución y el de los colocados en las líneas; estos últimos se coordinan con la protección de la subestación (fusible, restaurador o relés).
- Análisis de carga de los transformadores de distribución.
- Valoración económica de cambios de conductores.
- Valoración económica de conversión de voltaje.
- Corriente de falla en todo el circuito.

Opciones

Con el fin de brindar facilidades de explotación existen las siguientes posibilidades:

- Configuración opcional de circuitos: conexión y desconexión de cargas, capacitores o secciones de circuitos.
- Estudios perspectivas dando un porcentaje de crecimiento anual.
- Corrida simultánea de circuitos.
- Cogeneración.

CONCLUSIONES

El gran desarrollo de las técnicas de computación ha hecho posible convertir en realidad los análisis más exigentes en las redes de distribución llevando a su mínima expresión las suposiciones, simplificaciones y aproximaciones propias de los cálculos de la ingeniería. Los resultados que se obtienen presentan mayor sensibilidad a ciertos tipos de datos que a otros, y aunque no es posible hablar de forma absoluta con respecto a estos aspectos, se pueden valorar estas influencias de manera relativa.

Los datos de menor influencia sobre las respuestas son los de los parámetros de las líneas y transformadores, dado que la reactancia inductiva de una línea es función logarítmica de la separación entre conductores (tipo de estructura). Los parámetros de los transformadores difieren ligeramente para los distintos fabricantes. En este caso se han tomado valores promedios,⁴ susceptible de ser modificados.

Asimismo, los datos de mayor peso, sobre todo para valorar las pérdidas de energía, son los más difíciles de obtener: los gráficos horarios de las cargas, ya que aunque es posible disponer de curvas típicas,⁶ estas no siempre se adaptan para todas las regiones que se estudian. Los gráficos de carga pueden reajustarse, a partir de sus valores iniciales mediante

la comparación de la energía real consumida por el circuito medida en la subestación y la energía calculada. La experiencia indica que esta diferencia puede reducirse por esta vía hasta valores que oscilan entre un 0,5 y 5 %.

Los cálculos y las opciones disponibles en el sistema RADIAL ofrecen una herramienta de gran poder para enfrentar las principales tareas en el campo de la ingeniería de distribución. Los resultados de su aplicación en diferentes regiones del país han mostrado que es posible ir reduciendo el grado de incertidumbre que ha existido debido a las simplificaciones que tradicionalmente han estado presentes en este tipo de estudios, y que han conspirado contra la calidad de las respuestas a cada problema.

REFERENCIAS

1. Casas, L.: "Clasificación de las cargas en función del consumo de energía", UCLV, 1992.
2. Gonen, T.: *Electric Power Distribution System Engineering*. Mc Graw Hill Book Co. USA, 1986.
3. Casas, L. y G. Caso: "Criterios sobre la instalación de condensadores en circuitos de distribución radiales", *Centro, Suplemento Especial Energética*, p. 143, 1979.
4. Cook, R. F.: "Calculating Loss Reduction Offered by Shunt Capacitors Application", *IEEE Transaction on Power Apparatus and Systems*, Vol. 83, p. 1127, 1964.
5. Ghosh, Atish K. y otros: "Load Modeling for Distribution Circuit State Estimation", *Transactions on Power Delivery*, Vol. 12, No. 2, April, 1997.
6. Broadwater, Robert P. y otros: "Estimating Substation Peaks from Load Research Data. *Transactions on Power Delivery*, Vol. 12, No. 1, January, 1997.
7. Flaten, David: "Distribution System Losses Calculated by Percent Loading", *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*. Vol. 3 No. 3, August, 1988.

AUTORES

Leonardo Casas Fernández

Ingeniero Electricista, Doctor en Ciencias Técnicas, Centro de Estudios Electroenergéticos, Universidad Central de Las Villas, Cuba

Jorge Adrián Leyva Jassa

Ingeniero Electricista, Máster en Ingeniería Eléctrica Centro de Estudios Electroenergéticos, Universidad Central Marta Abreu de Las Villas, Cuba