

Balanceo de circuitos de distribución primaria

Primary distribution circuits balancing

Jorge Carrión González¹,
Julio Cuenca Tinitana¹,
Diego Orellana¹,
Raúl Carvajal Pérez^{2*}

¹ Universidad Nacional de Loja.

² Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría, La Habana-Cuba.

*Autor para correspondencia: jorge.carrión.g@unl.edu.ec

Recibido 26 de junio 2014; Aceptado 11 Septiembre 2014

Resumen

En el presente trabajo se presentan los resultados de aplicar un método de balance de las cargas que componen los circuitos de distribución primaria aplicando teoría combinatoria. Para buscar el balance ideal se realiza la búsqueda desde el último usuario hacia la subestación, pasando transformadores conectados a la fase más cargada hacia la menos cargada, siempre eligiendo el conjunto que más contribuya con el balance ideal. Para buscar un balance adecuado primero se pasan ramales monofásicos completos y después se estudian los ramales de tres conductores haciendo permutaciones de fase o cambiando el ramal completo desde el troncal principal del circuito de acuerdo al aporte que hagan en el proceso de balance. Finalmente, si es necesario, se cambian de fase las cargas monofásicas de los ramales trifásicos siguiendo en todos los casos una evaluación de los cambios que más se aproximen al balance ideal. Se presenta un ejemplo de un circuito “desbalanceado” utilizando un programa de computación elaborado por los autores para estos fines.

Palabras clave: balanceo, redes de distribución primarias.

Abstract

This paper presents the results of applying a method of balance of burdens that make up the primary distribution circuits by applying combinatorial theory. To find the ideal balance, the search is performed from the last user to the substation, through transformers connected to the most heavily loaded phase towards the less loaded, always choosing the set that most contribute to the ideal balance. To search for an appropriate first balance complete single-phase branches are passed and then look at the branches of three drivers doing permutations of phase or changing the full branch from the main trunk of the circuit according to the contribution made in the process of balance. Finally, if necessary, change of phase single-phase loads of offs in three-phase following an assessment of the changes that most approximate to the ideal balance in all cases. It presents an example of an “unbalanced” circuit using a computer program developed by the authors for these purposes.

Key words: Balancing, primary, distribution networks.

Introducción

Las redes de distribución primaria brindan servicio a las cargas trifásicas y monofásicas utilizando transformadores monofásicos independientes y bancos de dos o tres transformadores así como transformadores trifásicos. La energía es transportada a través de ramales que pueden tener uno, dos, tres y cuatro conductores. La diversidad de cargas a servir desde las fases del circuito puede llevar a circulación de corrientes por cada una de las fases del circuito que difieran mucho entre ellas provocando pérdidas y caídas de tensión innecesarias.

El balance de las corrientes en las fases de un circuito se debe realizar, en primera instancia, garantizando que las capacidades de transformadores conectadas a cada una de ellas sea del mismo orden (Llamo, 2007; Ramírez, 2007). Por otra parte, se trata de llevar los transformadores a un nivel de carga que se encuentre en un rango normado buscando la eficiencia de trabajo de los equipos. Si esto se logra, se puede asegurar que balanceando la carga conectada a cada fase, se tendrá un balance aceptable en el circuito.

El objetivo de este trabajo es presentar un método para realizar la evaluación del balance de cargas por fases en un circuito de distribución primaria y los resultados de algoritmo incorporados a un programa de computación desarrollado con estos fines.

Materiales y métodos

Con los métodos de estudio analizados (Carrión, 2011; Ignacio, 2008) se determinó que un sistema de distribución con las magnitudes de corriente en sus fases prácticamente equilibradas es el ideal, prácticamente resulta imposible mantenerlas en esta condición por lo que es necesario tratar de que las corrientes circulantes sean parecidas.

Se considera que un circuito está desbalanceado cuando el desbalance entre la fase más cargada y la menos cargada es mayor al 15 % con respecto a la fase más cargada (Llamo, 2007). De esta manera y mediante un análisis de redistribución de cargas, se puede obtener una diferencia entre las condiciones desbalanceadas y balanceadas permitiendo un ahorro de potencia y energía considerable, los efectos de un circuito balanceado y desbalanceado se los presenta en la Figura 1.

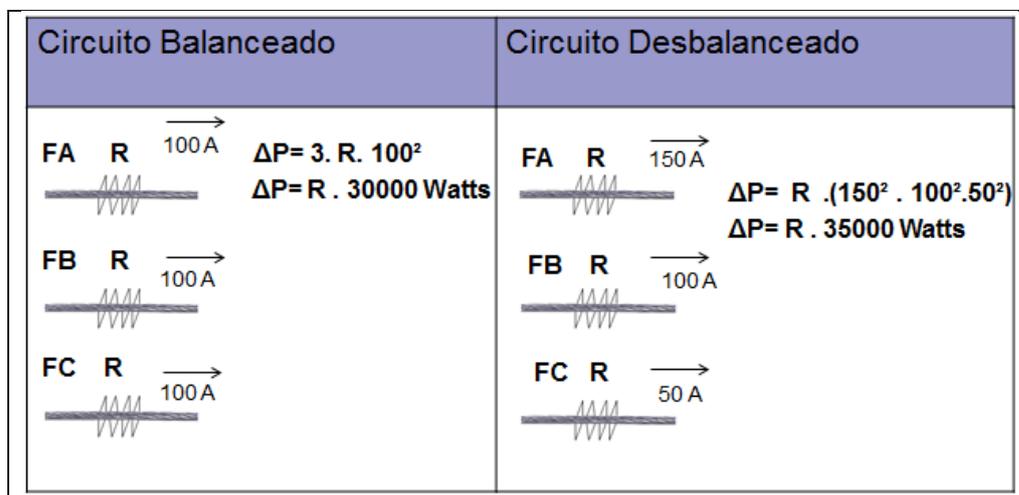


Figura 1. Diferencia entre un circuito balanceado y un desbalanceado

Para el desarrollo de este trabajo investigativo, se utilizó herramientas informáticas de programación, para el desarrollo del algoritmo de balanceo, mismo que se llevó a un software de uso específico, donde se incorporaron diferentes criterios de ingenieros que se dedican al análisis del mejoramiento de la eficiencia de las redes eléctricas de distribución.

Se desarrollaron los procedimientos para realizar el balance de los circuitos de forma automatizada siguiendo una secuencia de análisis de ramales desde el extremo de los circuitos hasta la subestación (Carrión, 2011; De Armas et al., 2007), conmutando los ramales monofásicos que se encuentran en la fase más cargada hacia la fase menos cargada que de conjunto contribuyan al balance, ajustando los ramales de dos fases y

neutro con el mismo criterio y si fuera necesario cambiando de fases las cargas monofásicas de ramales trifásicos hacia la fase más cargada. La cantidad de permutaciones que deben evaluarse es grande pero el orden establecido en el algoritmo y la velocidad de cálculo que permiten las máquinas actuales posibilitan que los resultados sean inmediatos. Este algoritmo incluye Balanceo de cargas de circuitos por teoría combinatoria. La aplicación de la teoría combinatoria para ejecutar los cálculos matemáticos de balanceo de los circuitos ofrece resultados positivos en todos los casos.

Resultados

Con la revisión bibliografía se llegó a determinar que el balance de cargas por fase en los circuitos primarios de distribución es una mejora organizativa básica que desarrollan las empresas suministradoras de energía; se debe realizar, muchas veces, antes de proceder a otros estudios puesto que los métodos más utilizados suponen que los circuitos que se estudian ya han sido balanceados. Se puede balancear la carga asignada a cada fase si se conoce la demanda pero si se realizan procesos de estimación de la distribución de la demanda se puede balancear la capacidad instalada como se describe en este artículo. Existen normas que establecen la máxima diferencia entre la corriente por las fases; por ejemplo, en muchas empresas se establece que la máxima diferencia entre la fase más cargada y la menos cargada no debe sobrepasar el 20 %.

Conceptos básicos

El método planteado se basa en algunos criterios prácticos seguidos por los ingenieros que realizan esta labor en empresas eléctricas ecuatorianas, cubanas, colombianas, entre otras.

1. Se realiza el balance desde los extremos del circuito a la subestación tratando de minimizar la diferencia total entre la fase más cargada y la menos cargada.
2. En primer lugar se mejora el balance pasando ramales monofásicos completos de la fase más cargada a la menos cargada.

3. Si es necesario se toman ramales de 3 conductores, se evalúa el cambio de fases del ramal completo y el intercambio de fases de algunas cargas entre las fases del ramal.
4. Si es necesario, se evalúa la efectividad de pasar algunas cargas monofásicas de ramales con cuatro conductores desde la fase más cargada a la menos cargada.

En todos los casos se busca que la carga que se pase de una fase a otra mejore el balance existente. Son designadas las fases y su carga como las siguientes variables:

FaseMasCargada , kVAMasCargada.
 FaseMedia, kVAMedia.
 FaseMenosCargada, kVAMenosCargada.

Sea:

“Desbalance=kVAMasCargada-
 FaseMenosCargada” (1)
 “Ideal=Desbalance/2” (2)

Clasificación de los nodos

Los nodos se clasifican en cuatro grupos. Un nodo *i* toma siempre el valor de la variable analizada (*i*) dependiendo del tipo de ramal y si se quiere evaluar ahora o no.

Analizado (*i*)

- = 1 Ramal con uno o dos conductores.
- = 2 Ramal con dos fases y neutro.
- = 3 Ramales con tres fases.
- = 5 Cuando no debe participar en el análisis de cambio de fases que se está haciendo en ese momento.

Estudio de ramales monofásicos

En el circuito existen n_1 ramales de este tipo, el algoritmo que se desarrolla busca la combinación de p ramales; “ $p=1,2,\dots,n_1$ ” que minimice el desbalance respecto al actual. En general las combinaciones posibles dependen del valor de p .

$$C_{n_1,p} = \frac{(n_1 \cdot (n_1 - 1) \cdot \dots \cdot (n_1 - p))}{p!} \text{ para } p=1,2,\dots,n_1 \quad (3)$$

Por ejemplo, si se evalúa “pasar dos ramales” de un total de 6 ramales monofásicos, las combinaciones posibles serán $C_{6,2}=6 \cdot 5 / 2 = 15$ combinaciones; es decir ramales 1y2, 1y3, ... 5 y 6.

Por experiencia, nunca en los balances se cambian de fases más de 5 ramales monofásicos y en tal caso se evalúan las combinaciones para $p=1,2,3,4,5$ que resulten en el circuito.

Algoritmo

Si lo mejor son los kVA que más aumenten el balance hasta el momento:

Se toma $k=1,2,...,n-1$ (total de ramales monofásicos).

Para fijar el primer nodo de un ramal k se busca el Nodo (k) como el No. del nodo que sale de un ramal de tres fases, siendo “Selecto” (“k”)=NodoBase (1)” designado como el nodo de un ramal trifásico que envía energía al Nodo(k) de la

Si $n \geq 5$ entonces:
Para:

$$\begin{aligned} & \text{“k=1,...,n-4”} \\ & \text{“l= k+1,...,n-3” (6)} \\ & \text{“m= l+1,...,n-2” (7)} \\ & \text{“p= m+1,...,n-1” (8)} \\ & \text{“q=p+1,...,n” (9)} \end{aligned}$$

Tomar:

$$\text{“kVASuma=kVA” (“Selecto” (“k”))+...+(Selecto” (“q”))” (10)}$$

Si:

$$\text{[“LoMejor-Ideal”]}>\text{[“kVASuma-Ideal”] mejora el balance (11)}$$

$$\text{“LoMejor=kVASuma;NodoBase” (“1”)=k;NodoBase” (“2”)=1;...;NodoBase” (“5”)=q”}$$

De esta forma se escoge la cantidad de ramales que más contribuyen al balance. Ahora hay que reajustar las fases de acuerdo a los resultados y evaluar la FaseMasCargada, FaseMedia y FaseMenosCargada y la carga conectada a ellas.

Balance de los ramales de dos fases y neutro:

Estos ramales pueden servir cargas monofásicas y trifásicas; se realizan dos procesos de balance en ellos: Cambio de fases de todo el ramal e intercambio de fases de cargas individuales. El procedimiento es el siguiente:

1. Se busca el inicio de cada ramal a partir de analizado (i) y se halla la carga de todo el ramal por fases.

fase más cargada.

Sea kVA (selecto(k)) los kVA instalados en el ramal y Fase(k) la fase más cargada, kVA en (k) es la carga conectada al ramal.

Sí:

$$\text{[“Lo mejor-Ideal”]}>\text{[“kVAen” (“Selecto” (“k”))-Ideal”] mejora el balance (4)}$$

Se hace:

$$\text{“LoMejor=kVAen(Selecto” (“k”)) y NodoBase” (“1”)=Selecto(k)” (5)}$$

Quiere esto decir que “Lo Mejor” se va guardando en una variable y el Nodo Base guarda el número del nodo que alimenta al ramal correspondiente. Al final queda el ramal que más contribuye al balance. El análisis se continúa tomando dos, tres, cuatro o cinco ramales que cambien de fase a la vez. En cada caso, la cantidad de combinaciones posibles se traduce en un conjunto de (p) lazos; por ejemplo, para el paso de cinco (5) ramales de un circuito de n nodos:

2. Si la diferencia entre la carga de las fases del ramal es menor que el “desbalance” total entre ellas, se hace el cambio de fases. Ejemplo, si:

En Total

$$\text{KVAFase A} = 600 \text{ kVA y } \text{kVAFaseB} = 500 \text{ kVA y}$$

En el ramal

$$\text{kVAdA} = 110 \text{ kVA y } \text{kVAdB} = 70 \text{ kVA;}$$

Al conmutar las fases mejora el balance en 80 kVA; es decir quedan:

$$\text{KVAFase A} = 560 \text{ kVA y } \text{kVAFaseB} = 540 \text{ kVA}$$

Dentro del ramal se evalúan ahora las cargas individuales comparando la diferencia entre las Fases y comparándolas con la diferencia total del circuito; si es menor, se intercambia la conexión de fases de la carga.

Balance de ramales de tres fases: Si fuera necesario, se evalúan las cargas monofásicas de

ramales trifásicos utilizando un procedimiento similar al de ramales monofásicos pero la carga equivalente del ramal es la carga del nodo trifásico.

Ejemplo: En la Figura 2 se muestra el módulo de balanceo donde se creó un circuito de 23 nodos, la capacidad instalada por fases se muestra en la parte inferior de esta figura.

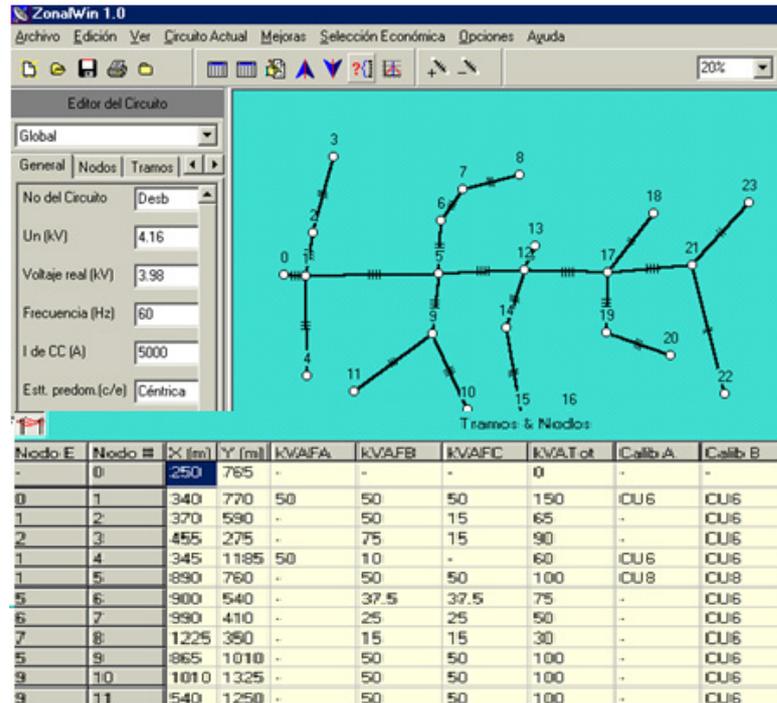


Figura 2. Unifilar del circuito.

En el análisis de estado actual se puede observar cargada la fase B y menos cargada la fase A. el nivel de desbalance del circuito, estando más

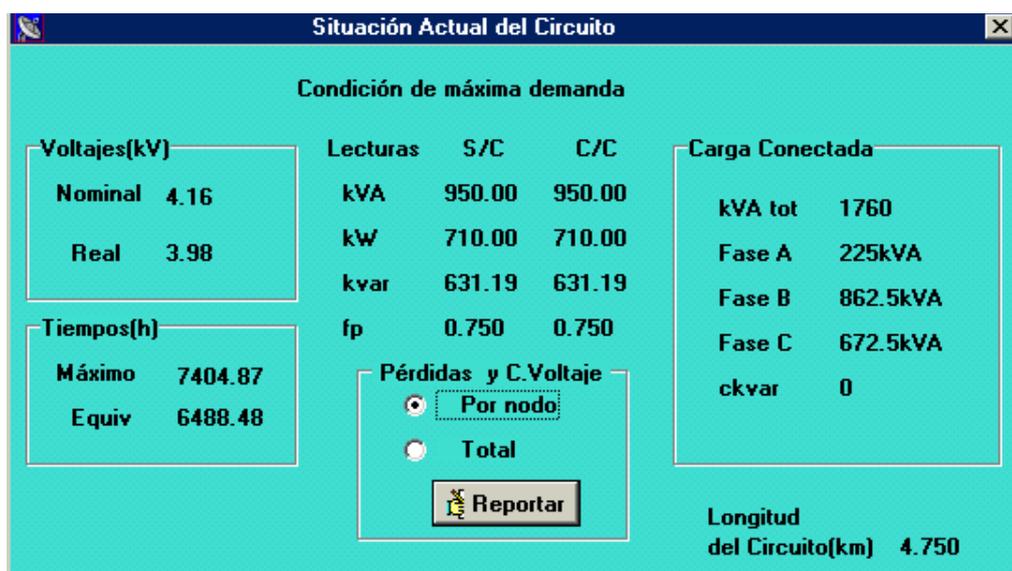


Figura 3. Estado actual de la carga conectada por fase

Se selecciona la opción de mejora Balance del Circuito. El balance de ramales monofásicos se muestra en la siguiente ventana.

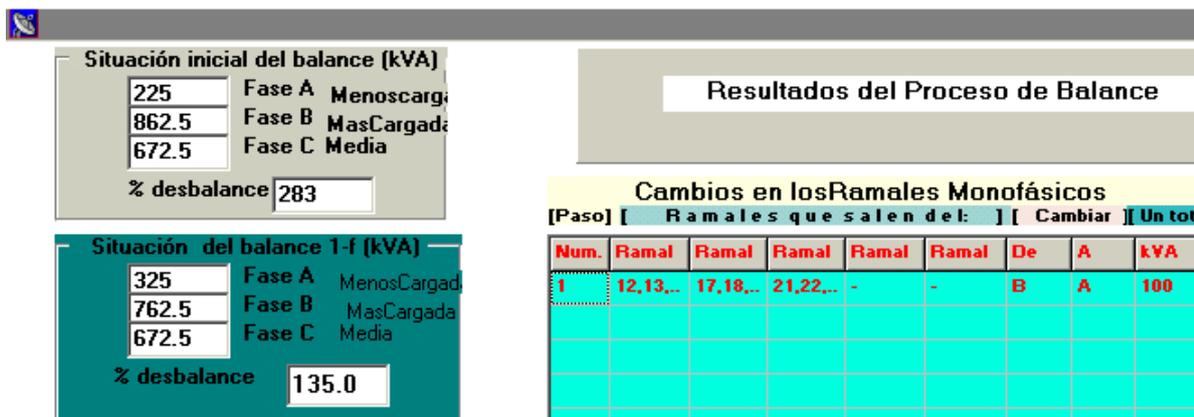


Figura 4. Balance de ramales monofásico.

Ya el nivel de balance es aceptable (8,1 %). En resumen, fueron cambiados de fases: tres ramales monofásicos y cuatro ramales de dos fases.

Discusión

El desarrollo de este software de uso específico, es una herramienta muy versátil que ayuda a la toma de decisiones a los ingenieros que se dedican a la labor de mejorar la eficiencia de las redes eléctricas. Se incluyen métodos de cálculo que no han sido contemplados en otros programas desarrollados para el análisis de redes eléctricas de distribución, la teoría combinatoria ofrece un sinnúmero de posibles combinaciones para balancear el circuito, siempre se trata de ajustar el desbalance existente a un valor por debajo del 15 % entre la fase más cargada y la fase menos cargada.

Conclusiones

Se desarrollaron los procedimientos para realizar el balance de los circuitos de forma automatizada siguiendo una secuencia de análisis de ramales desde el extremo de los circuitos hasta la subestación, conmutando los ramales monofásicos que se encuentran en la fase más cargada hacia la fase menos cargada que de conjunto más contribuyan al balance, ajustando los ramales de dos fases y neutro con el mismo criterio y si fuera necesario cambiando de fases las cargas monofásicas de ramales trifásicos hacia la fase más

cargada. La cantidad de permutaciones que deben evaluarse es grande pero el orden establecido en el algoritmo y la velocidad de cálculo que permiten las máquinas actuales posibilitan que los resultados sean inmediatos.

Literatura Citada

Casaravilla G., V. Echinope. 2010. "Desbalances. Estudio de alternativas para su estimación". Uruguay.

Carrión J., 2011. Resultados del Balanceo de los Circuitos de la Ciudad Loja-Ecuador. Fórum de Ciencia. CUJAE 2011.

De Armas T., S. Gómez, R. Julio, T. Perez. 2007. Análisis de un Sistema de Potencia desbalanceado mediante herramientas estadísticas. Empleo de Coeficientes Complejos y Modelación por Redes Neuronales Artificiales.

Ignacio P. 2008. Optimización del balance de carga en circuitos de distribución primaria.

Llamo H. 2007. SISTEMAS ELÉCTRICOS II. Centro de Investigaciones y Pruebas Electroenergeticas, Instituto Politécnico José Antonio Echeverría, La Habana.

Ramírez S. 2007. Redes de Distribución de Energía. Pp. 316.