



Balance de carga en circuitos de distribución primaria por algoritmo genético

Ignacio Pérez
Leonardo Casas

Recibido: Octubre del 2007
Aprobado: Diciembre del 2007

Resumen / Abstract

Aún cuando la operación más eficiente de un circuito trifásico se obtiene cuando la carga está totalmente balanceada entre las fases, desde el punto de vista operativo es prácticamente imposible mantener dicho balance las 24 h del día y en todos los nodos del circuito de distribución. La existencia de desbalance entre las corrientes de fase provoca un incremento de las pérdidas de potencia y energía en toda la longitud del circuito primario, al mismo tiempo que empobrece la calidad de la energía servida al contribuir al desbalance de los voltajes en los distintos nodos del circuito. El presente trabajo implementa un algoritmo genético simple SGA para seleccionar óptimamente las fases del circuito primario a que se deben conectar tanto los distintos bancos de transformadores de distribución, como los ramales bifásicos y monofásicos del circuito, de forma que se minimicen los costos de las pérdidas de energía a lo largo del mismo.

Palabras clave: Circuitos de distribución, balance de carga, algoritmo genético

In spite of the most efficient operation of a three phase circuit is obtained when the load is fully balanced, from the operative point of view, it is practically impossible to maintain that balance for the 24 hours of the day in all buses of the distribution network. The existence of unbalance in the phase currents produces an increase in power and energy losses in all the primary circuit length, at the same time that the power quality served to customers is decreased by the voltage unbalance in the circuit buses. The presented paper implements a simple genetic algorithm SGA to optimize the phase selection for the distribution transformers and transformers banks connection, as well as two and single phase feeder's connection to the circuit.

Key words: Distribution circuits, load balance, genetic algorithm

INTRODUCCIÓN

En Cuba, la distribución primaria se realiza mediante circuitos radiales trifásicos a cuatro hilos (tres fases y neutro) a voltajes de 13,8 kV (preferido) o 4,16 kV en los circuitos más antiguos.

Estos circuitos, de tres fases y neutro, parten de las subestaciones de distribución con conexión Δ -Yg, no obstante, en la medida de las necesidades, pueden poseer ramales de solo dos fases y neutro (bifásicos) o de una fase y neutro (monofásicos).

Por su parte, la distribución secundaria emplea fundamentalmente un sistema en delta con voltaje 120/240 V que se obtiene a partir de bancos trifásicos de dos o tres transformadores monofásicos, o de simples transformadores monofásicos con conexión de fase a neutro, fundamentalmente.

Aún cuando la operación más eficiente de un circuito trifásico se obtiene cuando la carga está totalmente balanceada entre las fases, desde el punto de vista operativo es prácticamente imposible mantener dicho

balance las 24 h del día y en todos los nodos del circuito de distribución.

Sin embargo, el uso de transformadores monofásicos, si bien tiene ciertas ventajas desde el punto de vista de la explotación de las redes en cuanto a inversiones y flexibilidad, al poder conformar bancos de diferentes características, contribuye de forma importante a acentuar el fenómeno del desbalance de carga entre las fases del circuito.

Por otra parte, la práctica de explotación de estos circuitos y el continuo incremento de la carga, provocan la adición de nuevos bancos de transformadores o la modificación de los ya existentes, lo que corrientemente se hace sin atender a consideraciones de balance en el circuito.

De hecho, se considera que estos circuitos son los que exhiben mayor desbalance entre todos los tipos de circuitos del Sistema Electroenergético Nacional (SEN).

La existencia de desbalance entre las corrientes de fase, provoca un incremento de las pérdidas de potencia y energía a lo largo de todo el circuito primario, al mismo tiempo que empobrece la calidad de la energía servida al contribuir al desbalance de los voltajes en los distintos nodos del circuito primario.

De esta manera, el objetivo del presente trabajo es seleccionar óptimamente las fases del circuito primario a que se deben conectar tanto los transformadores, como los ramales bifásicos y monofásicos del circuito, de forma que se minimicen los costos de las pérdidas de energía en toda la longitud del circuito.¹⁻³

FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

Para desarrollar la formulación matemática del problema, se considera que el circuito primario tiene una configuración radial trifásica, aunque puede contener NR ramales bifásicos o monofásicos. En todo su recorrido, el circuito tiene N nodos en los que pueden estar conectados bancos de transformadores.

El modo de conexión de los ramales y de los bancos de transformadores al circuito, determina la forma en que se reflejan las corrientes de carga en las fases del circuito y por lo tanto tienen una implicación directa en el desbalance de carga.

Ramales bifásicos

Un ramal bifásico siempre tiene que conectarse a la sección trifásica del circuito. Si se denota como X_R

la variable que representa la conexión de este ramal, las fases a que se conecta para las distintas variantes de conexión se muestran en la tabla 1.

Tabla 1
Variantes de conexión de un ramal bifásico

Fase	$X_R = 1$	$X_R = 2$	$X_R = 3$
F_1	A	B	C
F_2	B	C	A

Ramales monofásicos

Un ramal monofásico puede conectarse tanto a la sección trifásica como a un ramal bifásico.

En el primer caso las variantes de conexión son tres y se muestran en la tabla 2.

Tabla 2
Variantes de conexión de un ramal monofásico a sección trifásica

Fase	$X_R = 1$	$X_R = 2$	$X_R = 3$
F_1	A	B	C

Sin embargo, cuando el ramal se conecta a un ramal bifásico que lo precede, solo tiene dos variantes de conexión, pero de acuerdo con la propia conexión X_R^0 del ramal precedente, se generan las variantes que se presentan en la tabla 3.

Tabla 3
Variantes de conexión de un ramal monofásico a ramal bifásico

Ramal	$X_R^0 = 1$	$X_R^0 = 2$	$X_R^0 = 3$
Fase	$X_R = 1$ $X_R = 2$	$X_R = 1$ $X_R = 2$	$X_R = 1$ $X_R = 2$
F_1	A B	B C	C A

Bancos de tres transformadores

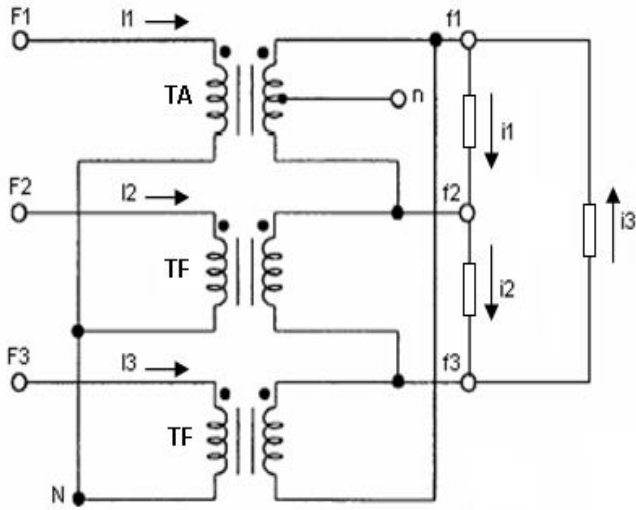
Los bancos de tres transformadores tienen conexión Y- Δ y se emplean cuando la carga trifásica a servir es mayor que la monofásica. En esta conexión, el neutro de la estrella no se conecta para evitar que el banco sirva de paso a las corrientes de secuencia cero tanto de carga como en régimen de falla.

Estos bancos se constituyen por un transformador de alumbrado (TA) a la que se conecta la carga monofásica

de 120/240 V y dos transformadores de fuerza (TF) iguales que completan el banco para suministrar carga trifásica a 240 V.

Para simplificar el análisis, se va a considerar que la carga monofásica de 120 V está perfectamente distribuida entre las dos secciones del TA, de forma que puede considerarse una carga al V_{LL} de 240 V con corriente I_{1F} , mientras que la carga trifásica de 240 V tiene una corriente por fase I_{3F} . Ver figura 1.

$$\begin{aligned} I_{1F} &= (P_{1F} - jQ_{1F})/V_{LL} \\ I_{3F} &= \frac{1}{3}(P_{3F} - jQ_{3F})/V_{LL} \end{aligned} \quad \dots(1)$$



Banco de tres transformadores con conexión Y - Δ .

1

Como puede inferirse de la figura 1, los voltajes de línea en el secundario están en fase con los voltajes de fase del primario, por lo cual las corrientes de carga i_1, i_2, i_3 estarán desfasadas adicionalmente los ángulos $(F_1), (F_2), (F_3)$ de los voltajes de fase en el primario. De esta forma:

$$\begin{aligned} i_1 &= (I_{1F} + I_{3F}) \exp(j\phi(F_1)) \\ i_2 &= (I_{3F}) \exp(j\phi(F_2)) \\ i_3 &= (I_{3F}) \exp(j\phi(F_3)) \end{aligned} \quad \dots(2)$$

Considerando que el neutro está desconectado en el primario y aplicando el principio de superposición, pueden determinarse las corrientes en el primario como:

$$\begin{aligned} I_1 &= +\frac{2}{3}i_1 - \frac{1}{3}i_2 - \frac{1}{3}i_3 \\ I_2 &= -\frac{1}{3}i_1 + \frac{2}{3}i_2 - \frac{1}{3}i_3 \\ I_3 &= -\frac{1}{3}i_1 - \frac{1}{3}i_2 + \frac{2}{3}i_3 \end{aligned} \quad \dots(3)$$

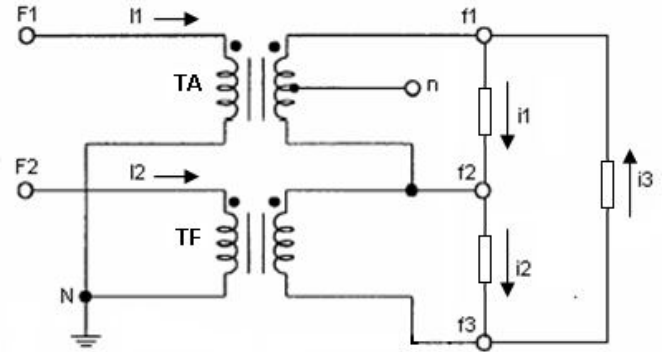
Como puede suponerse, este tipo de banco solamente puede conectarse a una sección trifásica del circuito, y como los dos transformadores de fuerza son iguales, las variantes de conexión al circuito primario, representadas por la variable X_B son tres (tabla 4).

Tabla 4
Variantes de conexión de un banco de tres transformadores

Fase	$X_B = 1$	$X_B = 2$	$X_B = 3$
F_1	A	B	B
F_2	B	C	A
F_3	C	A	B

Bancos de dos transformadores

Los bancos de dos transformadores tienen conexión Yg-Δ abierta y se emplean para dar servicio trifásico y monofásico combinados donde la carga trifásica es menor que la monofásica. Ver figura 2.



Banco de dos transformadores con conexión Y-Δ abierta.

2

Estos bancos pueden conectarse tanto en ramales trifásicos como bifásicos, ya que reciben alimentación de solo dos fases y neutro. Están constituidos por un TA donde se conecta la carga monofásica de 120/240 V y un TF que en conjunto pueden suministrar carga trifásica de 240 V.

Al igual que en el banco de tres transformadores, las corrientes de carga i_1, i_2, i_3 , se calculan por (2). Aplicando superposición, se obtienen las corrientes en el primario como:

$$\begin{aligned} I_1 &= i_1 - i_3 \\ I_2 &= i_2 - i_3 \\ I_3 &= 0 \end{aligned} \quad \dots(4)$$

Cuando este banco se encuentra conectado en una sección trifásica del circuito, existen seis variantes posibles de conexión (tabla 5).

Tabla 5
Variantes de conexión de un banco de dos transformadores en una sección trifásica

Fase	$X_B = 1$	$X_B = 2$	$X_B = 3$	$X_B = 4$	$X_B = 5$	$X_B = 6$
F_1	A	B	B	C	C	A
F_2	B	A	C	B	A	C
F_3	C	C	A	A	B	B

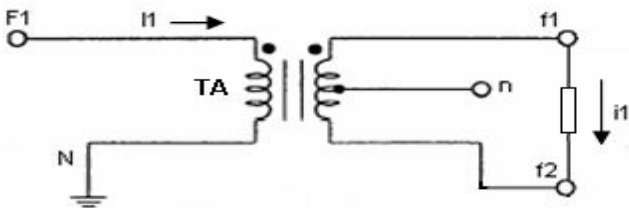
En el caso que este banco se encuentre conectado a un ramal bifásico, las variantes de conexión se reducen a solo dos, pero aquí el ramal bifásico puede conectarse a la sección trifásica del circuito en tres posiciones diferentes de acuerdo con el valor de la X_R del ramal (tabla 6).

Tabla 6
Variantes de conexión de un banco de dos transformadores en un ramal bifásico

Ramal	$X_R = 1$		$X_R = 2$		$X_R = 3$	
Fase	$X_B = 1$	$X_B = 2$	$X_B = 1$	$X_B = 2$	$X_B = 1$	$X_B = 2$
F_1	A	B	B	C	C	A
F_2	B	A	C	B	A	C
F_3	C	C	A	A	B	B

Transformadores monofásicos

Finalmente, los transformadores monofásicos se emplean para dar solo servicio monofásico a cargas de 120/240 V. Ver figura 3.



Transformador monofásico.

En este caso, solo hay corriente en la fase F_1 , por lo tanto:

$$\begin{aligned} I_1 &= i_1 \\ I_2 &= 0 \\ I_3 &= 0 \end{aligned} \quad \dots (5)$$

Estos transformadores pueden figurar en secciones trifásicas, bifásicas y monofásicas del circuito, por lo que las variantes de conexión dependen del número de fases de la sección.

Cuando el transformador se encuentra conectado en una sección trifásica del circuito, existen tres variantes posibles de conexión. Ver tabla 7.

Tabla 7
Variantes de conexión de un transformador monofásico en una sección trifásica

Fase	$X_B = 1$	$X_B = 2$	$X_B = 3$
F_1	A	B	B
F_2	B	A	C
F_3	C	C	A

Si el transformador se encuentra conectado a una sección bifásica del circuito, las variantes de conexión se reducen a solo dos, pero como el ramal bifásico puede conectarse a la sección trifásica del circuito en tres posiciones diferentes de acuerdo con el valor de la X_R del ramal, la tabla de conexiones se muestra en la tabla 8.

Tabla 8
Variantes de conexión de un transformador monofásico en un ramal bifásico

Ramal	$X_R = 1$		$X_R = 2$		$X_R = 3$	
Fase	$X_B = 1$	$X_B = 2$	$X_B = 1$	$X_B = 2$	$X_B = 1$	$X_B = 2$
F_1	A	B	B	C	C	A
F_2	B	A	C	B	A	C
F_3	C	C	A	A	B	B

Cuando el transformador monofásico se conecta a un ramal monofásico, solo hay una posición posible, por lo que no se genera variable. No obstante, la fase a que conecta el transformador varía de acuerdo con la fase a que se conecta dicho ramal. Como un ramal monofásico puede conectarse a la sección trifásica o

a un ramal bifásico, la fase de conexión del banco viene determinada por las tablas 2 y 3 que describen los casos posibles.

Variables independientes

De acuerdo con el análisis precedente, las variables del problema se representarán por el vector x , que contiene las variables de conexión X_R y X_B de todos los ramales, bancos de transformadores y transformadores monofásicos del circuito.

Los valores de x van a ser números enteros que pertenecen al conjunto de las posibles variantes de conexión de los diferentes elementos.

Función objetivo

Las pérdidas de potencia en un tramo k del circuito con resistencia $R_{f,k}$ de los conductores de fase y $R_{n,k}$ del conductor neutro, dependen de:

$$\Delta P_k = R_{f,k} \sum_{f=1}^{NF} |I_{f,k}|^2 + R_{n,k} |I_{n,k}|^2 \quad \dots(6)$$

Donde $I_{f,k}$ representa la corriente por la fase f e $I_{n,k}$ por el conductor neutro en dicho tramo k de NF fases.

Por su parte, las pérdidas de potencia del circuito de N tramos se obtienen por la suma de todos los tramos:

$$\Delta P = \sum_{k=1}^N \Delta P_k \quad \dots(7)$$

Estas pérdidas dependen de las conexiones de todos los elementos del circuito, por lo que son una función de x .

Para simplificar la formulación, se determinará el costo anual C de las pérdidas de energía del circuito, considerando que todas las cargas tienen igual comportamiento horario, mediante el producto de las pérdidas en horario de máxima demanda por las horas equivalentes Heq y el costo específico de la energía C_e .

$$C(x) = \Delta P_{MAX}(x) \cdot Heq \cdot C_e \quad \dots(8)$$

De esta manera, el objetivo debe ser minimizar $C(x)$ mediante la selección óptima de las conexiones representadas por x . Sin embargo, como la modificación de una conexión existente representa un costo para la empresa distribuidora, debe restarse este costo $K(x)$ que puede asumirse proporcional al número de cambios efectuados, quedando expresada la función objetivo del problema como:

$$F(x) = C(x) - K(x) \quad \dots(9)$$

Como se observa, el problema formulado es no lineal en enteros, lo que hace muy difícil su solución por métodos tradicionales. Además, los métodos enumerativos no pueden aplicarse por la gran cantidad de variantes que surgen. Por ejemplo, un circuito triásico con solo 10 transformadores monofásicos genera 59,049 variantes de conexión posible, mientras que un circuito con 20 bancos de dos transformadores genera $3,66 \cdot 10^{15}$ variantes.

Estos argumentos conducen a la idea de emplear un algoritmo genético para la solución de este problema.

ALGORITMO GENÉTICO

Para resolver el problema planteado se ha empleado un algoritmo genético simple SGA, con codificación binaria de las variables.

La única modificación al algoritmo tradicional ha sido la selección de un tamaño de cromosoma variable e igual al mínimo posible para representar en formato binario a cada una de las variables. Esto reduce la cantidad de variantes inválidas generadas por el algoritmo y acelera la búsqueda.

Como única restricción se incluyeron las cotas superiores a las variables mediante funciones de penalidad, quedando la función a maximizar por el SGA:

$$F_{SGA}(x) = -F(x) - \mu \cdot G(x) \quad \dots(10)$$

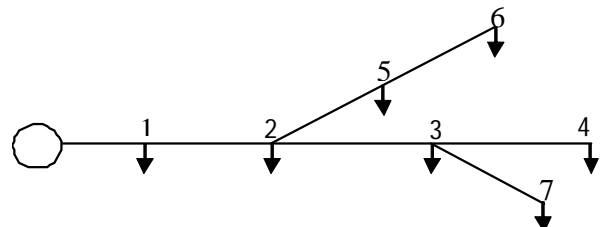
Donde μ es una constante de gran valor (ej. 10^6) y $G(x)$ representa la función de las restricciones según:

$$G(x) = \sum_k |x_k - x_{\max_k}|^2 \text{ si } (x_k > x_{\max_k}) \quad \dots(11)$$

La otra facilidad que se ha programado es la posibilidad de declarar determinados elementos (ramales, transformadores o bancos) que no quedan sujetos a la optimización, es decir, que no generan variables a optimizar.

EJEMPLO

Como ejemplo de prueba se ha utilizado el circuito de la figura 4, de 13,8 kV de siete nodos, que contiene un ramal bifásico y dos monofásicos.



Circuito de ejemplo.

En todos los tramos de línea se ha considerado una resistencia de un ohm (1Ω) tanto para los conductores de fase como para el neutro. Los restantes datos del circuito aparecen en la tabla 9.

Suponiendo la peor configuración con respecto al balance (todas las x tienen valor uno), la carga se concentra fundamentalmente en la fase A y en el neutro, como puede verse en la tabla 10.

Las pérdidas de potencia correspondientes a dicha distribución de las corrientes son 31,47 kW en el horario de máxima demanda.

Una vez ejecutado el programa de optimización, las corrientes por las fases se modifican a los valores mostrados en la tabla 11, donde puede apreciarse un buen balance de las corrientes de fase y un valor reducido de la corriente en el neutro.

Las pérdidas de potencia correspondientes a esta nueva distribución de las corrientes son solo 8,29 kW, lo que representa un ahorro del 73,7% con respecto a las pérdidas iniciales (por el carácter teórico del ejemplo, no se ha considerado el costo de los cambios de conexión y solo se han minimizado las pérdidas). La variante óptima obtenida para las conexiones de los ramales y bancos de transformadores se muestra en la tabla 12.

Tabla 9
Datos del circuito de ejemplo

Nodo	Fases del ramal	Transformadores del banco	P _{máx} kW	Q _{máx} kvar	Carga monofásica (p. u.)
1	3	3	100	50	0,5
2	3	2	100	50	0,5
3	3	1	100	50	1,0
4	3	1	100	50	1,0
5	2	2	100	50	0,5
6	1	1	100	50	1,0
7	1	1	100	50	1,0

Tabla 11
Distribución de las corrientes por fase (resultados)

Tramo	$[I_A]$ (A)	$[I_B]$ (A)	$[I_C]$ (A)	$[I_N]$ (A)
IC	(A)	IN	(A)	0 - 1
35,3	31,6	31,6	7,0	1 - 2
31,6	28,1	24,6	7,0	2 - 3
14,0	14,0	14,0	0,0	3 - 4
14,0	0,0	0,0	14,0	2 - 5
17,7	10,7	0,0	18,6	5 - 6
14,0	0,0	0,0	14,0	3 - 7

Tabla 10
Distribución de las corrientes por fase (peor caso)

Tramo	$[I_A]$ (A)	$[I_B]$ (A)	$[I_C]$ (A)	$[I_N]$ (A)
0 - 1	84,3	10,7	4,1	78,1
1 - 2	77,3	8,1	0,0	78,1
2 - 3	42,1	0,0	0,0	42,1
3 - 4	14,0	0,0	0,0	14,0
2 - 5	24,6	4,1	0,0	25,3
5 - 6	14,0	0,0	0,0	14,0
3 - 7	14,0	0,0	0,0	14,0

Tabla 12
Conexiones resultantes para los
A) Ramales

Ramal	Número de fases	Nodos	X_R	Fases		
				F1	F2	F3
1	3	1,2,3,4	1	A	B	C
2	2	5	1	A	B	
3	1	6	1	A		
4	1	7	3	C		

B) Bancos de transformadores					
Banco	Transformadores del banco	X_B	Fases		
			F1 (TA)	F2 (TF)	F3(TF)
1	3	3	C	A	B
2	2	4	C	B	
3	1	2	B		
4	1	1	A		
5	2	2	B	A	
6	1	1	A		
7	1	1	C		

CONCLUSIONES

El problema del balance de los circuitos de distribución primaria puede ser fácilmente formulado y resuelto mediante un algoritmo genético simple.

Aún cuando el ejemplo mostrado es netamente académico, se han realizado corridas exitosas con secciones de circuitos reales.

Por otra parte, la formulación realizada puede incorporar nuevas facilidades en la función objetivo, como el uso de gráficos de carga individuales para las diferentes cargas en lugar de horas equivalentes totales para el circuito.

Falta por investigar el comportamiento del algoritmo genético con respecto a los valores de probabilidades de mutación, cruzamiento, etc., que controlan el comportamiento de dicho algoritmo.

REFERENCIAS

1. **Blume, L. F.:** Transformer Engineering, John Wiley and Sons, New York, 1965.
2. **Gonen, T.:** Electric Power Distribution System, Engineering, McGraw Hill, 1986.
3. **Espinosa, L. R.:** Sistemas de distribución, Limusa, México, 1990.

AUTORES

Ignacio Pérez Abril

Ingeniero Electricista, Doctor en Ciencias Técnicas, Profesor Titular, Centro de Estudios Electroenergéticos, Universidad Central Marta Abreu de Las Villas, Villa Clara, Cuba
e-mail iperez@uclv.edu.cu

Leonardo Casas Fernández

Ingeniero Electricista, Doctor en Ciencias Técnicas, Profesor Titular, Centro de Estudios Electroenergéticos, Universidad Central Marta Abreu de Las Villas, Villa Clara, Cuba
e-mail: lcasas@uclv.edu.cu

La Dirección de Publicaciones Periódicas del Instituto Cubano del Libro, en el marco de la XVI Feria Internacional del Libro, otorgó a la Revista Ingeniería Energética un diploma por el XXX Aniversario de su fundación, así como por su destacada labor en las investigaciones, trabajos de desarrollos y soluciones directas a la producción y la industria, vinculados a la energía y su empleo.

