



Distribución de potencia en los alimentadores de baja tensión con varios conductores por fase

Héctor S. Llamo
María del C. Vázquez
Lázaro R. Guerra

Recibido: Julio del 2006
Aprobado: Septiembre del 2006

Resumen / Abstract

En las redes de distribución a 120/208 V, las corrientes debidas a las cargas son muy altas y ello obliga a instalar varios conductores en paralelo por fase. La mayor o menor asimetría de las corrientes que circulan por cada uno de los conductores que forman cada fase no son función del balanceo que se haga de la carga ni del mayor o menor desbalance de las tensiones sino de la disposición de las fases. En este trabajo se presentan las características y los resultados de un algoritmo para determinar cuál es la disposición de las fases que permiten obtener el mejor aprovechamiento de la capacidad instalada en los conductores del alimentador.

Palabras clave: Distribución de corriente, disposición de las fases

In the 120/208 distribution grids, the loads currents are very high. In this case it is necessary to install several conductors in parallel. The more or less asymmetry of currents in the different conductors that form every phase is function of the phase disposition and not of the more or less unbalance of the tension or the loads currents. In this work are presented the characteristics and the results of algorithms that permit to determine which the phase disposition is that bring the better use of the installed capacity of the feeder.

Key words: Currents distribution, phase disposition

INTRODUCCIÓN

Uno de los objetos de obra a 120/208 V (Y) del hospital oftalmológico Ramón Pando Ferrer está alimentado por un circuito dispuesto en una bandeja con conductores de 750 MCM (AWG). La disposición de los conductores que será llamada **original** era A-A-A, B-B-B y C-C-C, es decir, las tres fases "A", "B" y "C" estaban conectadas juntas a la misma barra y dispuestas una al lado de la otra.

Una medición de las corrientes en las fases y en cada uno de los conductores que las forman, hecha por el ingeniero Lázaro Guerra Hernández indicó que, aunque las corrientes totales por fase estaban prácticamente balanceadas, en los conductores individuales el desequilibrio era notable, desaprovechándose la capacidad instalada de los conductores. Se modeló el alimentador en el paquete Parlinc,¹ se corroboraron los resultados de la medición y se procedió a buscar cuál era la disposición de los conductores del haz que solucionaría esta dificultad.¹⁻³

RESULTADOS

La tabla 1 muestra la disposición original de los conductores en la bandeja y las que se simularon, para buscar la de menor asimetría en las potencias o las corrientes por conductor.

Modeladas las diferentes disposiciones en el paquete de programas Parlinc (anexo 1), se obtuvieron los resultados mostrados en las tablas de la 2 a la 4, para una demanda de 400+/j200 kVA y una tensión del envío de 208 V.

La tabla 2 muestra que la disposición de las fases que logran una mejor distribución de las corrientes por los conductores del haz en cada fase es la **variante 1** (A-B-C, A-B-C, A-B-C). Con las otras disposiciones de las fases se logró una cierta mejora con respecto a la **original**, pero no fueron mejores que la **variante 1**.

La tabla 3 muestra que el desbalance de las corrientes totales es pequeño para todas las variantes (entre 1,77 y 0,20 %) y que la más balanceada es la **variante 4** (A-C-C, A-B-A, B-B-C).

Los desbalances en porcentaje se calcularon mediante la expresión:

$$Desbalance = \frac{I_{M\acute{a}x} - I_{M\acute{i}n}}{I_{M\acute{a}x}} \cdot 100 \% \quad \dots(1)$$

Como el número de conductores por fase del alimentador estudiado es tres, la distribución ideal sería que por cada conductor circulara un tercio de la corriente total. El algoritmo utilizado en este análisis muestra el porcentaje de la corriente total que circula por cada uno de los conductores del haz, determina cuál es el mayor y obtiene su diferencia en porcentaje con respecto a la distribución ideal. La tabla 4 muestra los resultados de este estudio junto con otros resultados de interés.

De nuevo, la **variante 1** (A-B-C, A-B-C, A-B-C) es la que presenta la menor desviación con respecto a la ideal y como era de esperarse, es la que tiene las menores caídas de tensión tanto en el modelo por fase como en el modelo monofásico que supone la línea balanceada.

Tabla 1
Disposición de las fases de los conductores que forman el alimentador

Nombre asignado	Disposición de los conductores del haz en las fases		
	A	B	C
Original	A-A-A	B-B-B	C-C-C
Variante 1	A-B-C	A-B-C	A-B-C
Variante 2	A-C-C	B-B-B	A-A-C
Variante 3	C-C-A	A-A-B	B-B-C
Variante 4	A-C-C	A-B-A	B-B-C
Variante 5	A-B-C	A-C-B	B-C-A
Variante 6	A-B-C	C-A-B	B-C-A

Tabla 2
Distribución de la corriente por cada uno de los conductores que forman el haz de cada fase

Variante	Corrientes en las fases indicadas en ampere (A)								
	Fase I			Fase II			Fase III		
Original	A: 294	A: 312	A: 803	B: 623	B: 286	B: 536	C: 809	C: 264	C: 248
Var-1	A: 300	B: 393	C: 454	A: 476	B: 417	C: 445	A: 479	B: 444	C: 376
Var-2	A: 510	C: 356	C: 499	B: 281	B: 612	A: 340	A:340	A: 473	C: 489
Var-3	C: 255	C: 472	A: 614	A: 291	A: 522	B: 624	B: 274	B: 541	C: 668
Var-4	A: 408	C: 430	C: 385	A: 465	B: 635	A: 515	B: 376	7: 430	C: 546
Var-5	A: 289	B: 584	C: 433	A: 603	C: 396	B: 338	B: 335	C: 426	A: 404
Var-6	A: 320	B: 568	C: 451	C: 267	A: 526	B: 449	B: 262	C: 564	A: 448

Tabla 3
Corrientes totales por fase para las siete configuraciones analizadas

Variante	Corrientes en las fases en ampere (A)			Desbalance de las corrientes (%)
	Fase A	Fase B	Fase C	
Original	1 256,02	1 273,21	1 278,6	1,77
Variante 1	1 251,25	1 252,75	1 254,22	0,24
Variante 2	1 263,10	1 252,44	1 260,09	0,84
Variante 3	1 257,09	1 260,23	1 266,85	0,77
Variante 4	1 255,53	1 258,08	1 257,39	0,20
Variante 5	1 257,09	1 248,27	1 255,18	0,70
Variante 6	1 257,57	1 252,36	1 254,55	0,41

Tabla 4
Desviación máxima de la distribución de corriente con respecto a la ideal (33,33 %), caídas de tensión por fase y pérdidas de potencia activa totales

Variante	Desviación máxima (*)	Caída de tensión en las fases			Modelo monofásico (%)	Pérdidas (kW)
		A (%)	B (%)	C (%)		
Original	69,70	3,13	1,00	1,48	2,167	3,61
Var 1	37,43	1,03	0,86	0,78	0,914	2,68
Var 2	54,18	0,96	1,81	1,46	1,359	3,26
Var 3	61,67	1,97	1,78	0,92	1,604	3,56
Var 4	54,48	0,74	1,00	1,55	1,139	3,52
Var 5	52,17	0,55	1,68	0,91	1,009	2,70
Var 6	53,82	0,91	1,24	1,09	1,074	2,93

(*) Con respecto a la distribución ideal (33,33 % por cada conductor).

CONCLUSIONES

Se demostró que la disposición de las fases tiene una gran influencia en el comportamiento eléctrico de los alimentadores de baja tensión con más de un conductor por fase. No se agotaron las posibilidades con respecto a la disposición de las fases para no hacer demasiado extenso el trabajo. Además, se mostró que se posee una herramienta matemática que permite modelar alimentadores de baja tensión con cualquier configuración de hasta 28 conductores totales.

REFERENCIAS

- Llamo, H. S.:** "Algoritmos para realizar el análisis integral de las líneas de transporte de energía eléctrica", Paquete de programas Parlinc. Versión V-B, Cujae, Cuba, 2006.
- _____: "Algoritmos para el cálculo automatizado de las líneas de transporte de energía eléctrica", Tesis para optar por el grado de Doctor en Ciencias Técnicas. Facultad de Ingeniería Eléctrica, Cujae, Ciudad de La Habana, 1995.
- Halley, H. et al.:** "Untransposed EHV Line Computations". *IEEE Transactions on PAS*, pp.291-296, 1964.

AUTORES

Héctor S. Llamo Laborí

Ingeniero Electricista, Doctor en Ciencias Técnicas, Profesor Consultante, Centro de Investigaciones y Pruebas Electroenergéticas (CIPEL), Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría, Cujae, Ciudad de La Habana, Cuba
e-mail:hllamo@electrica.cujae.edu.cu

María del C. Vázquez Hidalgo Gato

Ingeniera Electricista, Máster en Ingeniería Eléctrica, Asistente, CIPEL, Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría, Cujae, Ciudad de La Habana, Cuba
e-mail:macarmen@electrica.cujae.edu.cu

Lázaro R. Guerra Hernández

Ingeniero Electricista, Máster en Ingeniería Eléctrica, Instructor, CIPEL, Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría, Cujae, Ciudad de La Habana, Cuba
e-mail:lazaro@electrica.cujae.edu.cu

ANEXO I

Para obtener la distribución de las corrientes y de las potencias en los conductores que forman un alimentador con NCA conductores activos, NC circuitos y NCH conductores en el haz, se utilizan circuitos equivalentes acoplados en cantidades de fase para los parámetros inductivos, matriz impedancia (Z), y para los parámetros capacitivos, matriz admitancia (Y). Dichas matrices tienen incorporado el efecto de la circulación de las corrientes por la tierra y el del conductor neutro.² Con dichas matrices se formó un circuito equivalente en cantidades de fase al que se le concentró la matriz impedancia en la mitad de la longitud del alimentador y la mitad de la matriz admitancia en ambos extremos, formándose un circuito II **nominal matricial**,³ porque la longitud de los alimentadores involucrados lo justifica. El orden de las matrices involucradas es igual al número de conductores activos del alimentador (9 en el caso analizado en este trabajo). No se despreció la capacitancia de la línea para darle generalidad al algoritmo del programa DPEALBT (Distribución de Potencias en los Alimentadores de Baja Tensión), pero los resultados demostraron que no afecta, pues las corrientes del envío y del recibo son idénticas.

La distribución no uniforme de las corrientes en los conductores del haz se debe al desbalance de los elementos mutuos de las matrices impedancia y admitancia, y este, depende de la configuración del alimentador, de los conductores del haz y de cómo se dispongan sus fases.

Las ecuaciones que representan un alimentador en cantidades de fase en función de las constantes generalizadas matriciales son:²

$$(U_e) = (A)(U_R) + (B)(I_R) \quad \dots(2)$$

$$(I_e) = (C)(U_R) + (D)(I_R) \quad \dots(3)$$

$$(U_R) = (D)(U_e) - (B)(I_e) \quad \dots(4)$$

$$(I_R) = -(C)(U_e) + (A)(I_e) \quad \dots(5)$$

(A), (B), (C) y (D) son las constantes generalizadas matriciales (CGM) del alimentador, que en este caso particular son de orden 9, que es el número de conductores activos de la línea. Para calcularlas, se utilizaron las propiedades de los cuadripolos conectados en cascada y se desarrollaron teniendo en cuenta las propiedades de las operaciones con matrices. Así, con las definiciones hechas, para formar el circuito II **nominal matricial**, los cuadripolos de los parámetros serie (Z), y paralelos del envío y el recibo (Y), quedan conectados en cascada y el cuadripolo resultante se obtiene como el producto de los cuadripolos componentes:

$$\begin{bmatrix} (U_e) \\ (I_e) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (1) & (0) \\ (Y) & (1) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} (1) & (Z) \\ (0) & (1) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} (1) & (0) \\ (Y) & (1) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} (U_R) \\ (I_R) \end{bmatrix} \quad \dots(6)$$

donde:

Los cuadripolos de los extremos, representan a la mitad de la matriz admitancia (Y), que es un elemento conectado en paralelo.

El cuadripolo intermedio representa a la matriz impedancia.

(Z): Elemento conectado en serie.

(1): Matriz unidad o identidad.

(0): Matriz nula.

(U_e) e (I_e) : Vector con las tensiones y las corrientes del envío.
 (U_R) e (I_R) : Vector con las tensiones y las corrientes del recibo.

Desarrollando el triple producto matricial mostrado en la ecuación 6 se obtiene la ecuación

$$\begin{bmatrix} (U_e) \\ (I_e) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (A) & (B) \\ (C) & (D) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} (U_R) \\ (I_R) \end{bmatrix} \quad \dots(7)$$

donde:

$(A) = (1) + \frac{1}{2}(Z)(Y)$ Sin dimensiones.

$(B) = (Z)$ Con dimensiones de impedancia.

$(C) = (Y)[(1)+1/4(Z)(Y)]$ Con dimensiones de admitancia.

$(D) = (1) + (Y)(Z)$ Sin dimensiones.

Son las constantes generalizadas del alimentador considerado con un orden igual a su número de conductores activos (9 en el caso analizado).

Características del algoritmo DPEALBT indicando los pasos que se siguen para obtener los resultados

1. A partir de la carga del recibo y de la tensión supuesta en el envío del alimentador, se corre un flujo monofásico (suponiendo condiciones balanceadas) mediante un método iterativo con una tolerancia para las tensiones de 0,01 kV. Sus resultados permiten, como se verá más adelante, calcular las impedancias de la carga en el recibo con una mejor aproximación y además, comparar los resultados del modelo monofásico con los del modelo por conductor activo.
2. A partir de la tensión supuesta en el envío, se forma el vector de las tensiones al neutro (U_e) . Dichas tensiones se suponen balanceadas y constantes durante todo el análisis, dicho de otra forma, la fuente se considera una barra de capacidad infinita.
3. Se calculan las corrientes de cortocircuito para los NCA conductores de la línea mediante la expresión.

$$(I_R)_{CC} = (B)^{-1}(U_e) \quad \dots(8)$$

Que se obtiene suponiendo que durante el cortocircuito es efectivo y que el vector de las tensiones del recibo es cero:

$$(U_R) = 0 \quad \dots(9)$$

Sustituyendo 8 en 3

$$(I_e)_{CC} = (D)(B)^{-1}(U_e) \quad \dots(10)$$

4. Se calculan los llamados factores de distribución de corriente (FDC) mediante la expresión:

$$FDC = \frac{\text{Corriente de cortocircuito en el conductor } i}{\text{Corriente de cortocircuito total en la fase } j} \quad \dots(11)$$

donde:

$i = 1, 2, 3$, NCA conductores activos.

$j = 1, 2$ y 3 fases.

Estos coeficientes dependen solo de los parámetros de fase del alimentador y permiten conocer cómo influye su configuración en la distribución de la corriente por cada uno de los conductores que lo forman, y mejorar dicha distribución mediante las modificaciones pertinentes.

5. A partir de la tensión para el recibo del alimentador calculada en el flujo de cargas monofásico (punto 1), se representa la carga del recibo mediante una impedancia y, aplicando el principio del divisor de corrientes, se determina qué parte de la impedancia total de la carga debe conectarse en serie con cada uno de los NCA conductores activos del alimentador. Con estas impedancias se forma la matriz diagonal para las demandas (Z_D).

6. Las tensiones del recibo se obtienen mediante la expresión:

$$(U_R) = (Z_D)(I_R) \quad \dots(12)$$

Sustituyendo la expresión (12) en las expresiones (2) y (3) y despejando, se obtienen dos expresiones evaluables para los vectores de las corrientes en el envío y en el recibo:

$$(I_R) = (E)^{-1}(U_e) \quad \dots(13)$$

$$(I_e) = (G)(I_R) \quad \dots(14)$$

Donde, para simplificar la notación, se definen:

$$(E) = (A)(Z_D) + (B) \quad \dots(15)$$

$$(G) = (C)(Z_D) + (D) \quad \dots(16)$$

7. Se calcula el vector de las tensiones del recibo (U_R) mediante la expresión (4), las mismas serán más o menos desbalanceadas en función de las características y los arreglos que se hagan al alimentador como se mostró en los resultados.

8. Se calculan los vectores de las potencias en cada conductor mediante la expresión:

$$(S_R) = (U_R)_{Tr} (I_R)^* = (P_R) + j(Q_R) \quad \dots(17)$$

donde:

(S_R) : Potencia aparente compleja en cada conductor (9 en este caso).

$(U_R)_{Tr}$: Transpuesta del vector de orden 9 con las tensiones del recibo.

$(I_R)^*$: Conjugada de las corrientes del recibo.

9. Se considera el error de la solución en cantidades de fase calculando la diferencia entre la potencia dada y la calculada para el recibo (Power Mismatch). Por ejemplo, para los 7 casos corridos el valor máximo de dicha diferencia se encontró para la variante **original** y fue del 0,28 % para la potencia activa y del 0,60 % para la reactiva.