

Original

CONFIGURACIONES DE LAS REDES ELÉCTRICAS DE DISTRIBUCIÓN PRIMARIA QUE DETERIORAN SU EFICIENCIA ENERGÉTICA

Configurations of the electric energy distribution systems that deteriorate their energy efficiency

MSc. José Felipe Báez-Matos. Profesor Instructor, Universidad de Granma,
Cuba, jbaezm@udg.co.cu

Ing. Raúl Arturo Jiménez- Rodríguez. Profesor Asistente, Universidad de Granma.
Cuba, rjimenez@udg.co.cu

Ing. Liset Valdés- Abreu. Universidad de Granma, Profesora instructora,
Cuba, lvaldesa@udg.co.cu

Recibido: 12/04/2018- Aceptado: 24/05/2018

RESUMEN

En este trabajo se ha realizado una revisión bibliográfica para evaluar cómo influyen en el régimen de operación de las redes eléctricas primarias trifásicas el empleo de ramales monofásicos y bifásicos, así como la conexión estrella delta abierta y determinar su influencia en los costos de las pérdidas de energía eléctrica al aumentar estas a lo largo del circuito.

Palabras claves: pérdidas de energía; delta abierta

ABSTRACT

In this paper has been carried out a bibliographical revision to evaluate how they influence in the steady-state operating point of operation of the electric primary three phases networks the employment of brunches single-phase and two-phases, as well as the connection shatters opened delta and to determine its influence in the costs from the electric power losses when increasing these along the circuit.

Key words: energy losses; open wye connections

INTRODUCCIÓN

En Cuba los circuitos eléctricos primarios constituyen la parte de un sistema de distribución que transportan la energía desde la subestación receptora secundaria o punto de alimentación del sistema donde el voltaje baja de niveles de subtransmisión 33 kV a voltajes de distribución primarios 13.2 – 4.16 (en desuso) kV hasta los primarios de los transformadores de distribución.

“Los circuitos primarios están conformados por los alimentadores principales y sus ramales laterales y sublaterales. Generalmente, los alimentadores principales están conformados en todo su recorrido por las tres fases, mientras que los ramales laterales y sublaterales son bifásicos y monofásicos”.

“Las redes primarias funcionan con los siguientes voltajes trifásicos: 13.2 kV y 4.16 (en desuso) kV y configuración estrella con neutro sólidamente puesto a tierra”.

También se emplea alimentación bifásica a 13.2 kV y monofásica a 7.62 kV.

“Al efectuar el diseño de circuitos primarios que alimentan cargas monofásicas y bifásicas, debe efectuarse una distribución razonablemente balanceada de estas entre las fases, admitiéndose un desequilibrio máximo del 10 % con la máxima regulación admisible”. (Ramírez Castaño, 2000)

Por su parte, “la distribución secundaria emplea fundamentalmente un sistema en delta con voltaje 120/240 V o 240/480 V, que se obtiene a partir de implementar bancos trifásicos de dos o tres transformadores monofásicos, o de simples transformadores monofásicos con conexión de fase a neutro, fundamentalmente”. (Lajes Choy 2001)

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 y con ello las pérdidas de potencia y energía activa”(Lajes Choy 2001).

MATERIALES Y METODOS.

El flujo de corrientes por las líneas donde se encuentran conectadas las unidades de cada banco de transformadores y su efecto sobre las pérdidas se comportan como sigue (Gonan 1986, Khan 2008):

a) Bancos de un transformador.

- Conexión fase-neutro: La circulación de corrientes por las líneas desde donde se conectan y por el neutro
- Conexión fase-fase: La circulación de corrientes por las dos líneas desde donde se conectan.

b) Bancos de dos transformadores.

- Conexión estrella abierta-delta abierta. La circulación de corrientes por las líneas dependen de la proporción de carga monofásica y trifásica y su ángulo de fase es de

alrededor de los 60°. La corriente en el neutro es la resultante de las anteriores con signo contrario.

- Conexión delta abierta-delta abierta. La circulación de corrientes por las líneas dependen de la proporción de carga monofásica y trifásica. Existen corrientes por las tres y obviamente no existe la corriente de neutro.

c) Bancos de tres transformadores.

- Conexión estrella-delta. La circulación de corrientes por las líneas dependen de la proporción de carga monofásica y trifásica. Existen corrientes por las tres fases, y como el neutro de la estrella está aislado no circula corriente por el mismo.
- Conexión delta-delta. La circulación de corrientes por las líneas depende de la proporción de carga monofásica y trifásica. Existen corrientes por las tres fases y obviamente no existe la corriente de neutro.

En todos los casos se producen desbalances de corriente en las fases. Por otro lado, como los transformadores de distribución no pueden cambiar sus derivaciones internas (taps) bajo carga, el voltaje por el secundario varía según lo hace el del primario, y la demanda del banco dependerá de las características de voltaje de las cargas asociadas al mismo.

Como resultado de la instalación de los bancos de transformadores formados por unidades monofásicas, es prácticamente imposible mantener un balance de las corrientes durante las 24 horas del día, por lo que su efecto se manifiesta con valores de pérdidas mayores que si no se considera este hecho. O sea siempre ocurrirá que:

$$[I_a^2 + I_b^2 + I_c^2 + I_n^2]R \geq 3I^2R$$

Por lo general existen muchos ramales de líneas de distribución primarias que nacen de troncos de líneas trifásicas, que necesariamente no deben ser extendidas las tres fases y por tanto estos ramales monofásicos provocan que las caídas de voltaje y las pérdidas de potencia no solo ocurran en los conductores de fase sino que también se adicionan las que ocurren en las rutas de retorno, ejemplo el conductor neutro.

CAÍDAS DE VOLTAJE Y PÉRDIDAS DE POTENCIA ACTIVA EN LÍNEAS ELÉCTRICAS PRIMARIAS DE DISTRIBUCIÓN CON DIFERENTES CONFIGURACIONES.

Para la Unión Nacional Eléctrica (UNE) de Cuba, y con ello todas sus dependencias provinciales y municipales, es muy importante mantener las líneas eléctricas primarias del Sistema Eléctrico Nacional (SEN) lo mejor balanceadas posible, es decir, que cada conductor o cable de nuestras líneas transporte similares valores de corriente eléctrica, que en definitiva se

traduce en similares valores de flujo de potencia, a fin de asegurar una buena regulación del voltaje, minimizando las pérdidas de potencia y energía eléctrica.

Es muy difícil de balancear las redes eléctricas de distribución primarias y secundarias, no así las redes de subtransmisión y transmisión, aunque actualmente en la subtransmisión se ha comenzado a instalar transformadores monofásicos lo que en el futuro provocará desbalance en esas líneas.

Las líneas eléctricas de distribución primaria, para no pecar de absoluto, por lo general son trifásicas y pueden ser:

- De tres conductores (tres fases sin neutro)
- De cuatro conductores (tres fases y neutro)

Estas redes eléctricas principales pueden tener muchos ramales, los cuales a su vez pueden ser de:

- Trifásicas tres fases sin neutro.
- Trifásicas tres fases y neutro.
- Monofásicas con voltaje de línea, no aterrada.
- Monofásicas con voltaje de fase, aterrada.
- Trifásicas dos fases con neutro, estrella abierta.

En los circuitos primarios, las cargas se alimentan a través de los transformadores de distribución, los que se forman fundamentalmente mediante la combinación de unidades monofásicas en forma de bancos de uno, dos o tres transformadores, en función de las proporciones de cargas monofásicas y trifásicas. Se presentan los siguientes casos:

a) Bancos de un transformador: Se emplean para dar servicio a cargas monofásicas (conexión de fase a neutro o entre fases)

b) Bancos de dos transformadores: Se usan para servir cargas mixtas con las monofásicas mayoritarias (conexión estrella abierta delta abierta, o delta abierta delta abierta)

c) Bancos de tres transformadores: Transformadores para cargas mixtas con carga trifásicas predominantes (conexión estrella delta o delta delta)

RAMALES DE LÍNEAS PRIMARIAS MONOFÁSICAS BIFILARES NO ATERRADAS.

Considere que tenemos un ramal sobrecargado de línea primaria monofásica y se convierte, manteniendo la misma carga y calibre de conductor, a su equivalente trifásico trifilar y balanceado. Como el flujo de potencia de entrada a ese ramal se mantiene invariable, tenemos (Gönen, 1986;Pansini, 2007; Westinghouse Electric Corporation, 1984; Ramírez Castaño,2000):

$$S_{1\phi} = S_{3\phi} \quad (1)$$

Donde los subíndices 1ϕ y 3ϕ se refieren a circuitos monofásicos y trifásicos respectivamente. La ecuación (1) puede ser reescrita como:

$$(\sqrt{3} V_f) I_{1\phi} = 3 V_f I_{3\phi} \quad (2)$$

Donde V_f es el voltaje de fase. Por tanto, de la ecuación (2) tenemos:

$$I_{1\phi} = \sqrt{3} I_{3\phi} \quad (3)$$

Entonces, para igualdad de carga y mismo calibre de conductor, la corriente en amperes de un ramal monofásico es $\sqrt{3}$ veces mayor que la corriente que fluye por ese ramal si el mismo fuese trifásico.

En cuanto a la caída de voltaje que se produce en un ramal de línea eléctrica trifásica, esta puede ser expresada como:

$$\Delta V_{3\phi} = I_{3\phi}(R \cos \phi + X \sin \phi) \text{ voltios/m} \quad (4)$$

Para un ramal monofásico se expresa como:

$$\Delta V_{1\phi} = I_{1\phi}(K_R R \cos \phi + K_X X \sin \phi) \text{ voltios/m} \quad (5)$$

Donde (Gönen, Turan, [1986]), (Pansini, Anthony J, [2007]):

Resistencia del conductor en ohm/m

X reactancia del conductor en ohm/m

$K_R = 2.0$ cuando se utiliza cable soterrado.

$K_X = 2.0$ cuando estamos en presencia de una línea aérea, con una precisión de $\pm 10\%$.

Los coeficientes K_R y K_X son factores de conversión de la resistencia y la reactancia del conductor y se emplean para convertir los valores trifásicos de R y X a su equivalente monofásico.

De manera que la ecuación (5) puede ser escrita nuevamente como:

$$\Delta V_{1\phi} = I_{1\phi}(2R \cos \phi + 2X \sin \phi) \text{ voltios/m} \quad (6)$$

Y sustituyendo la ecuación (3) en (6), tenemos:

$$\Delta V_{1\phi} = 2\sqrt{3} I_{3\phi}(R \cos \phi + X \sin \phi) \text{ voltios/m} \quad (7)$$

Si dividimos la ecuación (7) entre la (4) obtenemos el siguiente resultado:

$$\frac{\Delta V_{1\phi}}{\Delta V_{3\phi}} = 2\sqrt{3} = 3.46 \quad (8)$$

Concluyendo, la caída de voltaje que se produce en un ramal monofásico de una fase y neutro, no aterrado, que parte de una línea trifásica, es aproximadamente 3.46 veces mayor que si este ramal, manteniendo la misma carga y mismo calibre de conductor, fuese trifásico.

Ya que los voltajes bases para ramales monofásicos y trifásicos son:

$$V_{B(1\phi)} = \sqrt{3}V_{S,L-N} \quad (9)$$

y

$$V_{B(3\phi)} = V_{S,L-N} \quad (10)$$

La expresión (8) puede ser expresada como sigue en valores por unidad:

$$\frac{VD_{pu,1\phi}}{VD_{pu,3\phi}} = 2.0 \quad (11)$$

Lo que significa que la caída de voltaje en valores por unidad en un ramal monofásico no aterrado es 2 veces mayor que en un ramal trifásico, manteniendo la misma carga. De manera que, si la caída de voltaje en el ramal monofásico es 0.10 pu, en el ramal trifásico, para la misma carga y mismo calibre de conductor sería de 0.05 pu.

Las pérdidas de potencia activa es otro aspecto que debemos tener presente cuando extendemos, desde líneas trifásicas, ramales de líneas monofásicos. En los conductores de un ramal monofásico debido a las corrientes de carga y en su ramal trifásico equivalente es:

$$P_{LS1\phi} = 2I_{1\phi}^2 R \quad [\text{Watts}] \quad (12)$$

y

$$P_{LS3\phi} = 3I_{3\phi}^2 R \quad [\text{Watts}] \quad (13)$$

Respectivamente. Sustituyendo la expresión (3) en la (12), obtenemos:

$$P_{LS1\phi} = 2(\sqrt{3}I_{3\phi})^2 R \quad (14)$$

Dividiendo la expresión resultante (14) por la expresión (13) obtenemos:

$$\frac{P_{LS,1\phi}}{P_{LS,3\phi}} = 2.0 \quad (15)$$

Por lo que, manteniendo la misma carga, las pérdidas de potencia debido a las corrientes en los conductores de un ramal monofásico son 2 veces mayores que si este ramal fuese trifásico.

Por tanto, manteniendo la misma carga y mismo calibre de conductor, al convertir el ramal monofásico a su equivalente trifásico, tanto la caída de voltaje en valores por unidad como las pérdidas de potencia, se reducen a la mitad.

RAMALES DE DOS FASES MONOFÁSICOS Y ATERRADO EN UN SOLO PUNTO.

En general, este sistema actualmente no se utiliza debido a que tiene como desventaja que no existe corriente a tierra en el mismo. Este sistema puede ser comparado con un ramal trifásico balanceado de cuatro hilos de la siguiente manera, ya que la potencia de la carga se mantiene constante, tenemos (Gönen, Turan, 1986; Pansini, 2007):

$$S_{1\phi} = S_{3\phi} \quad (16)$$

$$V_S I_{1\phi} = 3V_S I_{3\phi} \quad (17)$$

De donde:

$$I_{1\phi} = 3I_{3\phi} \quad (18)$$

La caída de voltaje para un ramal trifásico es:

$$\Delta V_{3\phi} = I_{3\phi}(R\cos\phi + X\sin\phi) \quad [\text{voltios/m}] \quad (19)$$

Para un ramal monofásico se expresa como:

$$\Delta V_{1\phi} = I_{1\phi}(K_R R\cos\phi + K_X X\sin\phi) \quad [\text{voltios/m}] \quad (20)$$

Donde (Gönen, Turan, 1986; Pansini, 2007):

$K_R = 2.0$ cuando se emplea toda la capacidad del conductor neutro, si la sección del conductor neutro es la misma que la de los conductores de fase.

$K_R > 2.0$ cuando se emplea un conductor neutro de sección transversal mucho menor que el conductor de fase.

$K_X \cong 2.0$ cuando estamos en presencia de líneas áreas.

Por tanto, si $K_R = 2.0$ y $K_X = 2.0$, la ecuación (20) puede ser escrita como sigue:

$$\Delta V_{1\phi} = I_{1\phi}(2R\cos\phi + 2X\sin\phi) \quad \text{voltios/m} \quad (21)$$

Si sustituimos la ecuación (18) en la (21) obtenemos:

$$\Delta V_{1\phi} = 6 I_{3\phi}(R\cos\phi + X\sin\phi) \quad \text{voltios/m} \quad (22)$$

Al dividir la ecuación (22) entre la ecuación (19) se obtiene:

$$\frac{\Delta V_{1\phi}}{\Delta V_{3\phi}} = 6.0 \quad (23)$$

Lo que indica que la caída de voltaje que se produce en un ramal de línea monofásico de dos fases, aterrado en un solo punto y con el neutro a máxima capacidad según su sección transversal, es 6 veces mayor que su equivalente trifásico, con la misma carga y calibre de conductor.

Las pérdidas de potencia en los conductores debido a las corrientes de carga de un ramal monofásico de dos fases aterrado en un solo punto y con el neutro a plena capacidad, y de un ramal trifásico balanceado son:

$$P_{L,1\phi} = I_{1\phi}^2(2R) \quad (\text{Watts}) \quad (24)$$

y

$$P_{LS,3\phi} = 3I_{3\phi}^2 R \quad (\text{Watts}) \quad (25)$$

respectivamente.

Sustituyendo la ecuación (18) en la ecuación (24),

$$P_{LS,1\phi} = 3I^2(2R) \quad (\text{Watt)s} \quad (26)$$

Y al dividir esta última ecuación por la (25) obtenemos:

$$\frac{P_{LS,1\phi}}{P_{LS,3\phi}} = 6.0 \quad (27)$$

Por tanto, las pérdidas de potencia activa en los conductores de un ramal monofásico bifilar y aterrado en un solo punto, debido a las corrientes de carga y con el neutro a plena capacidad de acuerdo a su sección transversal, son 6 veces mayores que las pérdidas que se producen para esa misma carga y mismo calibre de conductor, si este ramal fuese trifásico.

RAMAL BIFILAR: UNA FASE Y NEUTRO MULTIATERRADO.

La figura 1 muestra el esquema de un ramal de línea monofásica de una fase y neutro multiaterrado (Gönen,1986;Pansini, 2007; Westinghouse Electric Corporation, 1984)

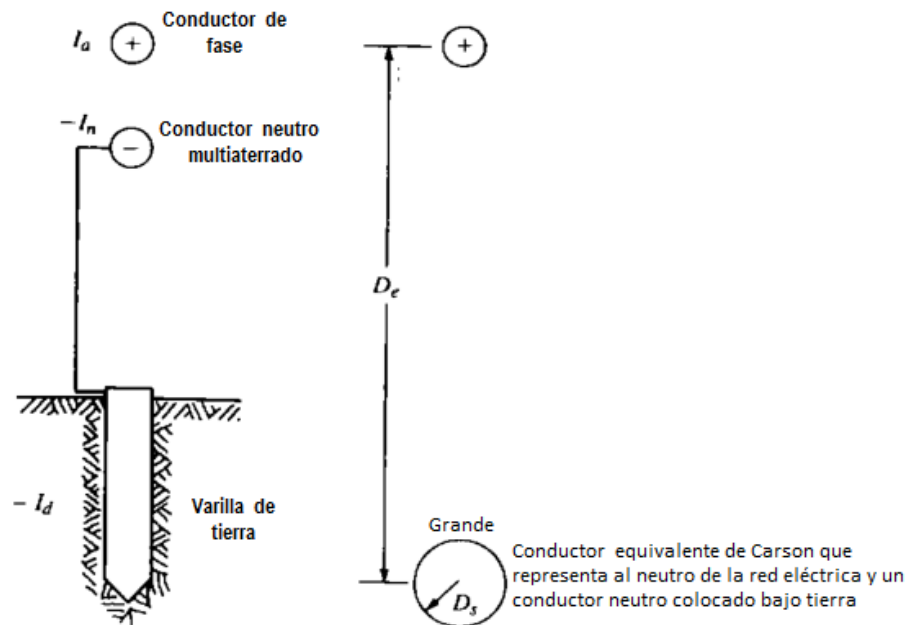


Fig. 1. Ramal monofásico con neutro común y multiaterrado.
Conductor equivalente de tierra de Carson. (Gonan 1986)

El conductor neutro de la red eléctrica se encuentra conectado en paralelo con otro conductor que representa a la tierra, pues el primero se encuentra aterrado en varios puntos mediante electrodos o varillas de tierra, con el objetivo de reducir la corriente en el conductor neutro, pues

disminuye la resistencia a tierra, ocurriendo un mejor drenaje hacia la tierra de la corriente que circula por el neutro. En la fig. 1 la corriente I_a es la que circula por el conductor de fase, la corriente I_n es la que retorna por el conductor neutro, y la corriente I_d es la que retorna por el conductor equivalente de tierra de Carson (Gönen, 1986). De acuerdo con Morrison (Gonan 1986), la corriente que retorna por el neutro es:

$$I = N_1 I_a \quad \text{donde } N_1 = 0.25 \text{ a } 0.33 \quad (28)$$

y este coeficiente es casi independiente de la sección transversal del conductor neutro.

En la fig. 1, la constante K_r es menor que 2.0 y la constante K_x es aproximadamente igual a 2.0 debido al gran valor de D_m (distancia media geométrica) del conductor equivalente de tierra de Carson (Gonan 1986).

De esta manera, los datos de Morrison (Gonan 1986) indican que:

$$\Delta V_{pu,1\phi} = N_2 \Delta V_{pu,3\phi} \quad \text{donde } N_2 = 3.8 \text{ a } 4.2 \quad (29)$$

$$P_{LS,1\phi} = N_3 P_{LS,3\phi} \quad \text{donde } N_3 = 3.5 \text{ a } 3.75 \quad (29)$$

Por tanto, asumiendo que los datos de Morrison (Gonan 1986) son precisos tenemos:

$$K_r < 2.0 \quad \text{y} \quad K_x < 2.0$$

la caída de voltaje en valores por unidad y las pérdidas de potencia, son aproximadamente igual a:

$$\Delta V_{pu,1\phi} \cong 4.0 \Delta V_{pu,3\phi} \quad (31)$$

$$P_{LS,1\phi} \cong 3.6 P_{LS,3\phi} \quad (32)$$

RAMAL DE DOS FASES Y NEUTRO (ESTRELLA – DELTA ABIERTA).

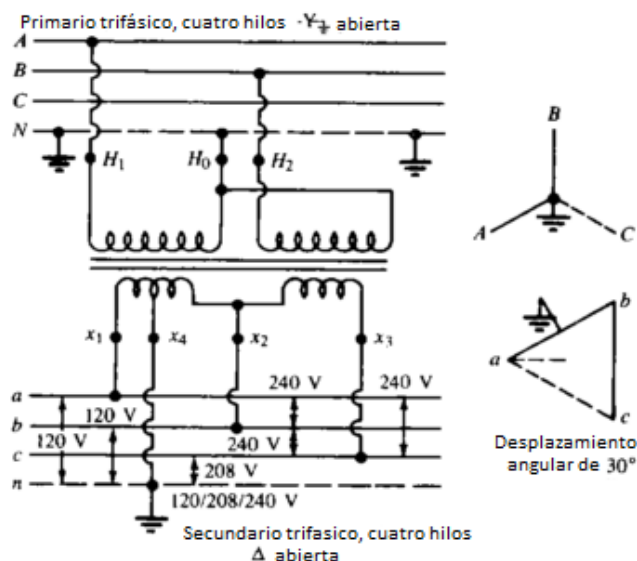


Fig. 2. Dos transformadores monofásico en conexión trifásica incompleta (estrella abierta-delta abierta).(Gonan 1986)

Para un ramal trifásico de dos fases y neutro, que nace de una línea trifásica de trifásica de tres fases y neutro, que tiene conectado un banco de transformadores en Estrella – Delta Abierta. En este caso, como es lógico, el conductor neutro puede estar aterrado en un solo punto o en varios puntos, aunque debido a las desventajas del primer tipo de conexión, este método es poco utilizado. Si el neutro se encuentra aterrado en un punto, toda la corriente circula por el neutro. Teóricamente se puede expresar que (Corporation 1964, Gonan 1986, Pansini 2007):

$$\bar{V} = \bar{Z}\bar{I} \quad (29)$$

De manera que:

$$\bar{V}_a = \bar{V}_a \bar{I}_a \quad (30)$$

$$\bar{V}_b = \bar{V}_b \bar{I}_b \quad (31)$$

Lo anterior es correcto para una división equitativa de la carga entre las dos fases. De manera que, para un caso como este, un ramal de dos fases y neutro puede ser comparado con su equivalente ramal trifásico, manteniéndose los kVA de la carga constante.

Por tanto:

$$S_{2\phi} = S_{3\phi} \quad (32)$$

$$2V_S I_{2\phi} = 3V_S I_{3\phi} \quad (33)$$

$$\text{De manera que:} \quad I_{2\phi} = \frac{3}{2} I_{3\phi} \quad (34)$$

El análisis de la caída de voltaje puede ser realizado en dependencia si el conductor neutro se encuentra aterrado en uno o en varios puntos. Si es el primer caso y la impedancia del conductor neutro (Z_n) es cero, la caída de voltaje en cada fase se puede calcular por (Corporation 1964, Gonan 1986):

$$\Delta V_{2\phi} = I_{2\phi} (K_R R \cos \varphi + K_X X \sin \varphi) \quad (\text{volt}) \quad (35)$$

Dónde $K_R = 1.0$

$K_X = 1.0$

$$\text{Por lo que } \Delta V_{2\phi} = I_{2\phi} (R \cos \varphi + X \sin \varphi) \quad (\text{volt}) \quad (36)$$

Sustituyendo la ecuación (34) en la (36) obtenemos:

$$\Delta V_{2\phi} = \frac{3}{2} I_{3\phi} (R \cos \varphi + X \sin \varphi) \quad (\text{volt}) \quad (37)$$

Dividiendo la ecuación (37) entre la (19) obtenemos:

$$\frac{\Delta V_{2\phi}}{\Delta V_{3\phi}} = \frac{2}{3} \quad (38)$$

Sin embargo, si el neutro se encuentra aterrado en un solo punto y la impedancia del neutro es mucho mayor que cero, entonces:

$$\frac{\Delta V_{2\phi}}{\Delta V_{3\phi}} > \frac{2}{3} \quad (39)$$

Por tanto, a este caso le es inherente el desbalance en los voltajes.

COMPORTAMIENTO DE LAS PÉRDIDAS EN LAS REDES PARA LA CONEXIÓN ESTRELLA – DELTA ABIERTA.

Las pérdidas de potencia y energía activa (kW; kWh) en la línea primaria trifásica que alimenta un banco de transformadores de distribución en conexión trifásica completa se expresan (Corporation 1964, Gonan 1986, Pansini 2007) por:

$$\Delta P_{3\phi} = \frac{S^2}{1000 V_L^2} \cdot L \cdot r$$

Dónde:

S – kVA de carga.

L – longitud de la línea en km.

V – voltaje de línea de operación de la red de distribución primaria en kV.

r – resistencia del conductor en Ω/km .

Utilizando una constante unitaria de pérdidas $K_{2\text{trif}}$ tenemos:

$$\Delta P_{3\phi} = \frac{S^2}{K_{3\phi}} \cdot L$$

Dónde:

$$K_{3\phi} = \frac{1000 \cdot V_L^2}{r}$$

Para un banco de transformadores de distribución en conexión **trifásica incompleta** (estrella–delta abierta) se expresan por:

$$\Delta P_{\Delta\text{abierta}} = \frac{1.32 \cdot S^2}{1333 V^2} \cdot L \cdot (2r_L + 3r_n)$$

$$\Delta P = \frac{1,32 \cdot S^2}{K_{2\Deltaabierta}} \cdot L$$

$$K_{2\Deltaabierta} = \frac{1333 V_L^2}{(2r_L + 3r_n)}$$

Considerando que el calibre de los conductores de fase y neutro son iguales y que la carga en kVA se mantiene constante, podemos calcular cuánto se incrementan las pérdidas de potencia activa en la línea de alimentación al pasar de alimentar una carga trifásica balanceada desde un banco de transformadores monofásicos en conexión trifásica completa a alimentar esa misma carga pero con un banco de transformadores en una conexión trifásica incompleta (estrella abierta – delta abierta), a saber:

$$\frac{\Delta P_{3\phi}}{\Delta P_{\Deltaabierta}} = \frac{K_{3\phi}}{K_{2\Deltaabierta}} = \frac{\frac{1000 \cdot V_L^2}{r}}{\frac{1333 \cdot V_L^2}{(2r_L + 3r_n)}} = \frac{\frac{1000 \cdot V_L^2}{r}}{\frac{1333 \cdot V_L^2}{5r}} = \frac{5000}{1333} = 3.751$$

De manera que las pérdidas de potencia y energía activa provocadas en el alimentador primario que energiza un banco de transformadores en conexión incompleta, desde el punto de ubicación del mismo hasta la subestación de subtransmisión, se incrementan prácticamente 4 veces con respecto a cuándo el banco es construido en conexión trifásica completa (estrella delta).

Al terminar el trabajo se evidencia que se han superado las expectativas y el objetivo propuesto. Obteniéndose así, las siguientes conclusiones:

CONCLUSIONES

1. Para igualdad de carga, la corriente en amperes de un ramal monofásico es $\sqrt{3}$ veces mayor que la corriente que fluye por ese ramal si el mismo fuese trifásico y su carga balanceada.
2. La caída de voltaje que se produce en un ramal monofásico no aterrado, que parte de una línea trifásica, es aproximadamente 3.46 veces mayor que si este ramal, manteniendo la misma carga y balanceada, fuese trifásico.
3. Manteniendo la misma carga y convirtiendo el ramal monofásico a su equivalente trifásico con carga balanceada en cada fase, tanto la caída de voltaje en valores por unidad como las pérdidas de potencia, se reducen aproximadamente a la mitad.

4. Las pérdidas de potencia activa que provocan las corrientes de carga en un ramal de dos fases y neutro multiterrado, es aproximadamente 1.64 veces mayor que si este ramal fuese trifásico y la carga balanceada.
5. Si no se considera el efecto de aterrar el conductor neutro, las pérdidas de potencia y energía activa en el alimentador primario se incrementan aproximadamente 4 veces cuando se alimenta una carga trifásica balanceada desde un banco de transformadores de distribución monofásicos en conexión trifásica incompleta (estrella-delta abierta).
6. Como en la actualidad Cuba, desde el punto de vista financiero, no está en condiciones de convertir su distribución eléctrica primaria y secundaria en totalmente trifásica a 4 hilos, es muy saludable que los ramales monofásicos de nuestras redes se encuentren bien optimizados desde el punto de vista del calibre de conductores y longitud.

RECOMENDACIONES

Al analizar las conclusiones es necesario hacer las siguientes recomendaciones a la UNE:

1. Reducir al mínimo posible la instalación de nuevos servicios trifásicos alimentados de bancos de transformadores monofásicos en conexión incompleta estrella abierta-delta-abierta.
2. Proceder, previo análisis técnico económico, al completamiento de la tercera fase primaria donde se encuentre un ramal de línea primaria que alimente un banco de transformadores de unidades monofásicas conectadas en conexión incompleta estrella delta-abierta y luego llevar la conexión de este banco de transformadores a conexión completa.
3. Sugerir a los creadores de programas informáticos para calcular regímenes de operación de redes eléctricas primarias de distribución que analicen la posibilidad de incluir en dichos programas la influencia que provocan los bancos de transformadores conectados en conexión incompleta estrella-delta abierta.

REFERENCIA BIBLIOGRÁFICA

Casas, Leonardo, *Sistemas Electroenergéticos*, Tomo I y II, Universidad Central de las Villas, 1982.

Comisión Nacional de Energía. *Electroenergética. Cálculos Rápidos*, 1985.

Electrical Engineering Handbook, Richard Dorf, CRC Press Taylor & Francis Group, 2000.

- Electric Power Engineering Handbook - Power Systems. Leonard Grigsby, CRC Press Taylor & Francis Group, 2000.
- Feodorov, A.A. Y Eduardo Rodríguez López: Suministro eléctrico a empresas industriales, Ed. Pueblo y Educación, La Habana, 1980.
- Gönen, Turan. Electric Power Distribution System Engineering. McGraw-Hill series in electrical engineering, McGraw-Hill Inc. 1986. Pág. 328 - 349
- Handbook of electric power calculations, Beaty, Wayne, McGraw-Hill, 3rd edition, 2001.
- Industrial Power Systems, Shoab Khan, CRC Press Taylor & Francis Group, 2008.
- Lajes Choy, Santiago.: Pérdidas por líneas en las conexiones de transformadores y bancos de distribución. Revista Ingenierías, Julio – Septiembre 2001, Vol. IV, No. 12.
- Transmission and distribution Electrical Engineering. Colin Bayliss, ElsevierLtd, 2007.
- Ramírez Castaño, Samuel. Redes de Distribución de Energía. Universidad Nacional de Colombia. 2000.
- Pansini, Anthony J. Electrical Distribution Engineering. The Fairmont Press, Inc. USA, 2007.
- Transmission and Distribution Reference Book. Westinghouse Electric Corporation, East Pittsburgh, 1964.
- Corporation, W. E. (1964). Transmission and Distribution Reference Book.
- Gonan, T. (1986). Electric Power Distribution System Engineering.: 749.
- Khan, S. (2008). Industrial Power Systems.
- Lajes Choy, S. (2001). "Pérdidas por líneas en las conexiones de transformadores y bancos de distribución. ." Revista Ingenierías Vol. IV.: 15.
- Pansini, A. J. (2007). Electrical Distribution Engineering