

Pérdidas por las líneas en las conexiones de transformadores y bancos de distribución

Santiago Lajes Choy
Davel Borges V., Carlos Hernández R.*

Abstract

This paper describes a study to evaluate the substitution of the lazy capacity in a distribution transformer. The study includes the comparison between the winding connections for full and incomplete transformers banks on the energy losses. The effects of the neighbor lines on the energy losses of the bank are included. Finally, a mathematical expression is proposed in order to evaluate the substitution full bank for the connection of two transformers.

Palabras clave: transformadores, sustitución, pérdidas.

INTRODUCCIÓN

En los últimos años la literatura especializada¹⁻³ le ha dedicado atención al tema de la sustitución de las capacidades ociosas, tanto en transformadores independientes, como bancos de transformadores de distribución, buscando la disminución de las pérdidas de potencia y energía. En el presente trabajo se realiza un análisis de los transformadores monofásicos a partir del concepto de coeficiente de carga límite y como resultado del mismo se evalúa la sustitución de unidades en bancos de transformadores de distribución, incorporando el efecto de la asimetría en la variación de las pérdidas por las líneas de alimentación del banco.

PÉRDIDAS EN TRANSFORMADORES DE DISTRIBUCIÓN

Las pérdidas de potencia en un transformador de distribución se expresan como:

$$\Delta P = \Delta P_0 + \Delta P_c K^2 \quad (1)$$



donde:

K = Coeficiente de carga

$\Delta P_0, \Delta P_c$ = Pérdidas de vacío y cortocircuito, respectivamente.

En la figura 1, se plantea ΔP Vs. K para transformadores de distribución. De estas curvas se observa (a modo de ejemplo) que para un transformador de 25kVA de potencia nominal, trabajando con un coeficiente de carga igual a 0.2, puede ser sustituido, con el objetivo de disminuir las pérdidas y eliminar capacidad ociosa, por uno de 15 kVA siempre y cuando el nuevo coeficiente de carga sea menor de 0.52, siendo este último el coeficiente de carga límite. En esa misma línea de pensamiento, ese transformador de 25 kVA puede ser sustituido por otro de 10 kVA si el coeficiente de carga es menor de 0.70.

*

Facultad de Electromecánica Departamento Eléctrica,
Universidad de Camagüey, Cuba.

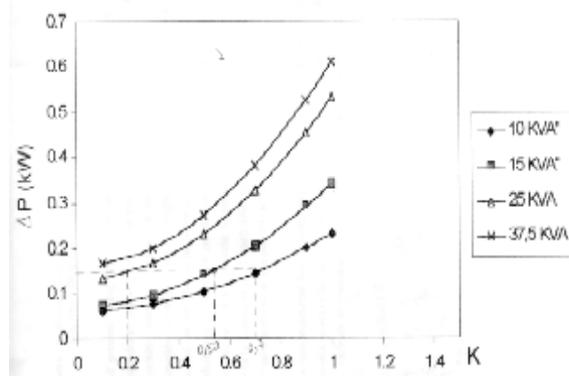


Fig. 1. Dependencia de las pérdidas en función de K.

De esta forma el coeficiente de carga límite, por debajo del cual se puede sustituir un transformador de mayor capacidad por uno de menor potencia nominal, se podrá hallar a partir de igualar ambas expresiones de pérdidas de potencia, de donde:

$$K_L = \sqrt{\frac{\Delta P_0 - \Delta P_{01} + \Delta P_c K^2}{\Delta P_{c1}}} \quad (2)$$

donde:

$\Delta P_0, \Delta P_{01}$ = Pérdidas de vacío para el transformador de mayor y menor capacidad, respectivamente.

$\Delta P_c, \Delta P_{c1}$ = Pérdidas de cortocircuito para el transformador de mayor y menor capacidad, respectivamente.

K = Coeficiente de carga del transformador de mayor capacidad.

K_L = Coeficiente de carga límite, del transformador menor.

Los autores proponen una tabla con todos los valores de coeficiente de carga límite para diferentes coeficientes de carga del transformador mayor, para diferentes capacidades contiguas e

intermedia. Estos no se presentan en el trabajo por motivos de espacio.

VALORACIÓN ECONÓMICA DE LA SUSTITUCIÓN DE UN TRANSFORMADOR MONOFÁSICO

Si en el análisis comparativo el coeficiente de carga real de transformador de menor capacidad K_1 es menor que el coeficiente de carga límite, entonces en una primera instancia podrá sustituirse el transformador mayor por ese de menor potencia. Si $K_1 > K_L$ entonces no es posible hacer el cambio.

No obstante, si es recomendada la sustitución de la unidad mayor por una de menor capacidad ($K_1 < K_L$), habrá que completar el análisis con una valoración económica, la que probará la racionalidad o no de la sustitución.

En este caso, recomendamos hacer el análisis comparativo a partir del VAN de costo [4], cuya expresión será:

$$VANc = K + \sum_{j=1}^N \frac{(C_E + C_A)_j}{(1 + TD)^j} + \beta \tau \sum_{j=1}^N \frac{\Delta P_j}{(1 + TD)^j} \quad (3)$$

donde:

K = costo del transformador.

$C_e = p_e K$; $C_A = p_A K$ = gastos anuales de explotación y de amortización, respectivamente.

p_e, p_A = coeficiente de reparaciones corrientes y mantenimientos y de amortización, respectivamente.

TD = Tasa de descuento o de interés del banco.

N = No. total de años de análisis.

β = Costo del kW-h de pérdidas.

τ = Tiempo de pérdidas.

ΔP = pérdidas de potencia.

Para que el transformador de mayor capacidad (sin subíndice) pueda ser sustituido por uno de menor capacidad (subíndice 1), se debe cumplir.

$$VAN_{c1} \leq VAN_c \quad (4)$$

Sustituyendo la expresión (3) en la (4) para ambos transformadores, en un año j concreto, tenemos que:

$$\frac{\Delta\epsilon - \Delta\epsilon_1}{\Delta K} \geq \frac{1 + p \sum_{j=1}^N \frac{1}{(1+TD)^j}}{\beta \sum_{j=1}^N \frac{1}{(1+TD)^j}} \quad (5)$$

donde:

$\Delta K = K - K_1$ = Gastos adicionales para sustituir el transformador mayor por el menor.

$\Delta\epsilon, \Delta\epsilon_1$ = Pérdidas de energía para cada transformador respectivamente.

Para $p\Sigma = p_A + p_e = 0,056$; $TD = 10\%$ y $\beta = 0,063$ \$ kW-h, suponiendo que el cambio se quiere producir al quinto año de explotación del transformador mayor, tenemos:

$$\frac{\Delta\epsilon - \Delta\epsilon_1}{\Delta K} \geq 5,07 \text{ kW.h/ \$} \quad (6)$$

Es decir que por cada peso adicional en el cambio, tendrá que ahorrarse más de 5,07 kW-h, de lo contrario no sería racional efectuar la sustitución de esa capacidad ociosa. Para el cambio en el año 10 de explotación se exige 3,47kW.h de ahorro por peso adicional invertido y si el cambio se produce a los 20 años, entonces el ahorro deberá ser de 2,75. Obsérvese que al aumentar la tasa de interés el

ahorro de pérdidas exigido es mayor por peso invertido. Por otra parte mientras más tiempo de explotación tenga el transformador de mayor capacidad, menor será el ahorro de pérdidas límite por peso invertido en el cambio. Esto satisface la lógica, pues mientras más años de explotación tenga el equipamiento más fácilmente se justifica su sustitución en caso de estar sub-utilizado.

Probemos precisar los componentes de ΔK :

$$\Delta K = K_d + K_{M1} + K_{eq1} + K_r - K$$

donde:

K_d = Costo del desmontaje del transformador mayor.

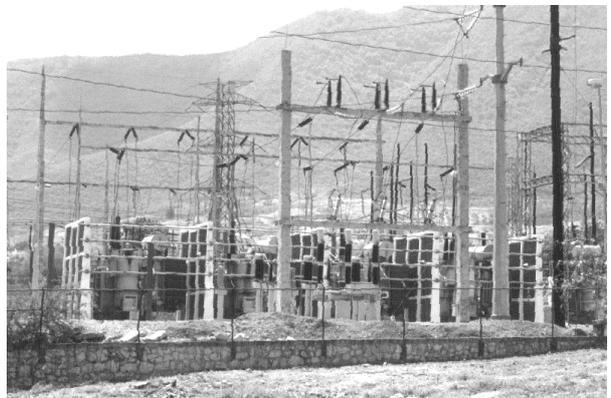
K_{M1}, K_{eq1} = Costo del montaje y del transformador de menor capacidad.

$K_r = K (1 - p_r t_j)$ = Costo no amortizado de la inversión (K).

p_r = Coeficiente de renovación, que es el inverso del tiempo normativo de duración del transformador mayor (t_{nd}).

t_j = Tiempo de explotación del transformador mayor en el año j que se produce el cambio.

Sustituyendo en la expresión (7) el valor de K_r , obtenemos:



$$\Delta K = K_d + K_{M1} + K_{eq1} - p_r t_j K \quad (8)$$

Para el cambio en el año 10 de explotación se exige 3,47 kW/h de ahorro por peso adicional invertido y si el cambio se produce a los 20 años, entonces el ahorro deberá ser de 2,75.

Obsérvese que la suma del 2do y 3er término es igual al costo K_1 del nuevo transformador y que para $t_j = 0$ (no explotación del transformador mayor), desaparece el último término de la expresión (8) y cuando $t_j = t_{nd}$ entonces se hace igual a K .

VALORACIÓN ECONÓMICA DE LA SUSTITUCIÓN DE UN TRANSFORMADO TRIFÁSICO

Interesante resulta analizar bancos de transformadores con tres transformadores iguales las cuales alimentan cargas trifásicas y bancos con dos transformadores de fuerza y uno de alumbrado, que por supuesto alimentan cargas trifásicas y monofásicas.

Valoremos inicialmente bancos de tres transformadores iguales. En este caso el análisis se realiza si es detectado que el banco está subcargado, a partir de aquí se evalúa la factibilidad de desconectar uno de los tres transformadores, recordemos que esta conexión se utiliza para cargas trifásicas fundamentalmente

Para el banco completo, este entrega la potencia trifásica.

$$S_c = \sqrt{3} I_L V_L \quad (9)$$

donde:

I_L, V_L = Corriente y voltaje de línea en Amperes y kV respectivamente.

En el caso de dos transformadores (banco incompleto).

$$S_1 = 2 I_L V_f / \sqrt{3} \quad (10)$$

Las pérdidas de energía para el banco completo se expresan:

$$\Delta E = 3 \Delta P_0 T + \frac{1}{3} \Delta P_{cc} \left(\frac{S}{S_N} \right)^2 \tau \quad (11)$$

donde:

$\Delta P_0, \Delta P_{cc}$ = Pérdidas de potencia (kW) en vacío y de cortocircuito de un transformador.

T, τ = Tiempo total de conexión del banco y de pérdidas (horas)

S, S_N = Potencia aparente (kVA) de la carga total y nominal de un transformador, respectivamente.

Para el banco incompleto, conociendo que cada transformador entrega 0,577 S, se tiene:

$$\Delta E_f = 2 \Delta P_0 T + \frac{2}{3} \Delta P_{cc} \left(\frac{S}{S_n} \right)^2 \tau \quad (12)$$

Graficando en un mismo diagrama las expresiones (11) y (12), se obtienen zonas óptimas de utilización para ambas conexiones, aunque todavía sin incluir la influencia de las pérdidas en las líneas de alimentación.

Igualando las expresiones (11) y (12), se obtiene el valor de carga crítica que limita las zonas de utilización.

$$S_c = \sqrt{\frac{3 \Delta P_0 T}{\Delta P_{cc} \tau}} S_n \quad (13)$$

Evaluando los resultados a partir de la expresión (13) (tabla I), se observa que los valores de S_c están muy por debajo del total de potencia instalada en la conexión de dos transformadores, e incluso en bancos de unidades hasta 100 kVA varían entre 1.14 y 1.48 de la potencia de un transformador y en bancos de 167 a 333 kVA, alrededor de 0,9.

TABLA I. Resultados de la potencia crítica, obtenidos con la expresión (13)

S_N (de un transf., kVA del Banco)	$\Delta P_o/\Delta P_{cc}$ (kW)	T/τ	S_c (kVA)	S_c/S_N
5	0,036/0,1	8000 / 3940	7,40	1,48
10	0,06/0,17	2,03	14,66	1,46
15	0,07/0,27	2,03	18,84	1,25
25	0,13/0,4	2,03	35,17	1,40
37,5	0,16/0,45	2,03	55,18	1,47
50	0,19/0,58	2,03	70,62	1,41
75	0,25/0,9	2,03	97,54	1,30
100	0,3/1,4	2,03	114,23	1,14
167	0,3/2,3	2,03	148,84	0,89
250	0,49/3,5	2,03	230,84	0,92
333	0,6/4,5	2,03	300,06	0,90

EFFECTO DE LAS CONEXIONES EN UN TRANSFORMADOR TRIFÁSICO

Probemos incorporar al análisis las pérdidas que tienen lugar en las líneas que alimentan a los bancos de transformadores de distribución.

En ese caso, para la conexión completa, las pérdidas de energía por la línea se expresan:

$$\Delta E_{LC} = \frac{S^2}{K_{2c}} L\tau \quad (14)$$

donde:

L = Longitud en kilómetros de la línea de alimentación.

$K_{2c} = \frac{1000V_L^2}{\gamma_L}$ = constante unitaria de pérdidas,

V_L = Voltaje de Línea en kV.

γ_L = Resistencia por kilómetro de la línea, Ω/km .

De forma similar, pero considerando la asimetría de la conexión estrella – delta abierta del banco incompleto, las pérdidas de energía por la línea serán [1]:

$$\Delta E_{LI} = \frac{1.32S^2}{K_{2I}} L\tau \quad (15)$$

donde:

$$K_{2I} = \frac{1333V^2}{(2\gamma_L + 3\gamma_n)}$$

γ_n = Resistencia por kilómetro del neutro, Ω/km .

Obsérvese que $K_{2I} < K_{2c}$, por lo que para una misma combinación de carga y longitud de la línea de alimentación el cambio de la conexión completa a la incompleta produce un incremento de las pérdidas por la línea, en otras palabras, tiende a reducir la zona óptima de utilización de la conexión incompleta.

Incorporando las pérdidas por línea a las expresiones (11) y (12), se obtienen las ecuaciones generales para la conexión completa e incompleta:

$$\Delta E_c = 3\Delta P_o T + \left(\frac{S}{S_n}\right)^2 \left(\frac{1}{3}\Delta P_{cc} + \frac{S_n^2 L}{K_{2c}}\right) \tau \quad (16)$$

$$\Delta E_l = 2\Delta P_o T + \left(\frac{S}{S_n}\right)^2 \left(\frac{2}{3}\Delta P_{cc} + \frac{1.32 S_n^2 L}{K_{2l}}\right) \tau \quad (17)$$

Igualando las expresiones (16) y (17), se puede hallar el valor de carga crítica, que limita la zona de utilización de ambas conexiones:

$$S_c = \sqrt{\frac{\Delta P_o T}{\left[0.33\Delta P_{cc} + \frac{1.32 S_n^2 L \gamma_L (2\gamma_L + 3\gamma_n)}{(3000\gamma_n + 667\gamma_L) V_L^2}\right]}} S_n \quad (18)$$

Si comparamos las expresiones (18) y (13), obsérvese que para $L=0$, (no considerar el efecto de las pérdidas por la línea), la expresión (18) se convierte en la (13). De considerar este efecto como se propone en el presente trabajo, la ecuación (18) nos confirma que al incorporar el efecto producido por las pérdidas en las líneas de alimentación de los bancos se reduce la zona de utilización de la conexión incompleta y esto se agudiza en la medida que se incrementa la longitud de la línea. Por otra parte a incrementos del voltaje nominal, S_c aumenta y la zona óptima de los bancos completos se reduce.

Si resulta que el banco completo está cargado a un valor menor que la expresión (18), entonces en una primera instancia pudiera eliminarse una de las tres unidades y trabajar en conexión incompleta. No obstante a este análisis habrá que incluirle los gastos adicionales necesarios para concretar esta medida técnica. Esto lo evaluaremos mas adelante. Si la carga es mayor que S_c , no es necesario aplicar la medida.

RESULTADOS EN EL CASO DE UN BANCO CON UNIDADES NO IGUALES

Para evaluar el comportamiento de los bancos de transformadores compuestos por dos unidades de fuerza iguales y una de alumbrado, donde esta última tiene una capacidad nominal mayor que cualquiera de las otras dos. Aquí como se conoce el transformador de alumbrado asume 2/3 de la carga monofásica, y cada transformador de fuerza 1/3 de esta carga, por lo que se suministra 4/3 de la carga monofásica, engendrándose una capacidad ociosa. La carga trifásica se distribuye a partes iguales.

Tomado lo anterior en consideración, para el banco completo:

$$\Delta E_c = \left(2\Delta P_0 + \Delta P_{03}\right) T + \left[\frac{\Delta P_{cc} \left(\frac{2}{9}K^2 + \frac{4}{9}K + \frac{2}{9}\right)}{S_n^2} + \Delta P_{cc3} \frac{\left(\frac{4}{9}K^2 + \frac{4}{9}K + \frac{1}{9}\right)}{(S_{n3})^2} \right] S_{3\Phi}^2 \tau \quad (19)$$

donde:

$\Delta P_0, \Delta P_{cc}$ y $\Delta P_{03}, \Delta P_{cc3}$ = Pérdidas de potencia (kW) en vacío y de cortocircuito de un transformador de fuerza y el de alumbrado, respectivamente.

$K = \frac{S_{1\Phi}}{S_{3\Phi}}$ = Relación entre la carga monofásica y trifásica.

S_n, S_{n3} = Potencia aparente nominal del transformador de fuerza y alumbrado respectivamente.

En el caso del banco incompleto, considerando que se desconecta uno de los transformadores de fuerza, toda la carga monofásica la asume el transformador de alumbrado y la trifásica se distribuye por igual en los dos transformadores a $0,577 S_{3\phi}$ cada uno, por lo que aquí aparece la capacidad ociosa a consecuencia de la carga trifásica.

La expresión para el banco incompleto quedará de la siguiente forma:

$$\Delta E_1 = (\Delta P_0 + \Delta P_{03})T + \left[\frac{0.33\Delta P_{cc} + \Delta P_{cc3}}{S_n^2} + \frac{K^2 + 1.15K + 0.33}{S_{n3}^2} \right] S_{3\phi}^2 \tau \quad (20)$$

La potencia trifásica crítica, que limita las zonas óptimas de cada conexión se obtiene a partir de igualar las expresiones (19) y (20) y está dada por la siguiente ecuación:

$$S_{3\phi c} = \sqrt{\tau \left[\frac{\Delta P_0 T}{\Delta P_{cc3} \frac{5}{9} K^2 + \frac{6.35}{9} K + \frac{2}{9} - \Delta P_{cc} \left(\frac{2}{9} K^2 + \frac{4}{9} K - \frac{1}{9} \right)} \right]} \quad (21)$$

Obsérvese que para $K=0$ y $S_{n3} = S_n$, $\Delta P_{cc3} = \Delta P_{cc}$ es decir, para bancos de transformadores con tres unidades iguales y sin carga monofásica, la expresión (21) se transforma en la (13).

Incorporado al análisis las pérdidas por las líneas de alimentación, éstas se expresan para los bancos completos e incompletos de la siguiente forma:

$$\Delta E_{Lc} = \frac{(1.77K^2 + 2.66K + 1) S_{3\phi}^2}{K_{2c}} L \tau \quad (22)$$

$$\Delta E_{Li} = \frac{(K^2 + 2.3K + 1.32) S_{3\phi}^2}{K_{2i}} L \tau \quad (23)$$

Observándose que para $K=0$, las expresiones (22) y (23) se convierten en las (14) y (15) respectivamente.

Integrando el efecto por la línea y en los bancos las expresiones de pérdidas de energía para la conexión completa e incompleta será:

$$\Delta E_c^i = (2\Delta P_0 + \Delta P_{03})T + [A1 + A2 + A3] S_{3\phi}^2 \tau \quad (24)$$

donde:

$$A1 = \Delta P_{cc} \left(\frac{2}{9} K^2 + \frac{4}{9} K + \frac{2}{9} \right) \frac{1}{S_n^2}$$

$$A2 = \Delta P_{cc3} \left(\frac{4}{9} K^2 + \frac{4}{9} K + \frac{1}{9} \right) \frac{1}{S_{n3}^2}$$

$$A3 = \frac{(1.77K^2 + 2.66K + 1)L}{K_{2c}}$$



$$\Delta E'_l = (\Delta P_0 + \Delta P_{03})T + [B1 + B2 + B3]S_{3\phi}^2 \tau \quad (25)$$

donde:

$$B1 = \Delta P_{cc} \frac{(0.33\Delta P_{cc})}{S_n^2}$$

$$B2 = \Delta P_{cc3} \frac{(K^2 + 1.15K + 0.33)}{S_{n3}^2}$$

$$B3 = \frac{(K^2 + 2.3K + 1.32)L}{K_{2l}}$$

Igualando ambas expresiones, obtenemos la potencia aparente crítica que limita las zonas de utilización de las conexiones en análisis y está dada por la siguiente expresión:

$$S_{3\phi c} = \sqrt{\frac{\Delta P_0 T}{\tau \{C1 - C2 + C3\}}} \quad (26)$$

donde:

$$C1 = \Delta P_{cc3} \frac{\left(\frac{5}{9}K^2 + 0.7K + \frac{2}{9}\right)}{S_{n3}^2}$$

$$C2 = \Delta P_{cc} \frac{\frac{2}{9}K^2 + \frac{4}{9}K - \frac{1}{9}}{S_n^2}$$

$$C3 = \left[\frac{K^2 + 2.3K + 1.32}{K_{2l}} - 1.77K^2 + 2.66K + 1 \right] L$$

Comparando las expresiones (26) y (21), obsérvese que para $L = 0$, la expresión (26) se convierte en la (21). Al incrementar la longitud de la línea, la zona de utilización de la conexión incompleta se reduce, lo que satisface la lógica. Por otra parte a incrementos del voltaje nominal,

aumenta K_{2l} y K_{2c} y por consiguiente aumenta la zona de utilización del banco incompleto.

Igual que evaluamos en bancos de tres unidades iguales, la carga que asume el banco completo asimétrico es inferior a S_c (Expresión 26), entonces en una primera instancia resulta recomendable desconectar una unidad. En ambos casos debemos incorporar al análisis la inversión adicional necesaria para aplicar la medida técnica. Recomendamos entonces, efectuar el análisis comparativo a partir del VAN de costo (4) y las expresiones (3), (4) y (5) de forma similar a transformadores independientes.

CONCLUSIONES

Se muestran los valores del coeficiente de carga límite en función del coeficiente de carga del transformador ocioso.

Se realiza un análisis comparativo entre transformadores de capacidades contiguas y alternas.

Para evaluar la racionalidad de efectuar la sustitución de la capacidad ociosa, además de cumplir que el coeficiente de carga del transformador menor debe ser menor que el coeficiente de carga límite ($K_1 < K_L$), debe incluirse un análisis a través del VAN de costo.

Se precisa el ahorro de pérdidas de energía exigido por peso adicional invertido, que aumenta a incrementos de la tasa de interés y viceversa y disminuye en la medida que el cambio se produce con más años de explotación del transformador mayor.

Se presenta un análisis comparativo entre las conexiones de transformadores de distribución con bancos completos e incompletos.

Se evalúan los resultados para los casos de bancos con 3 transformadores iguales y para bancos con 2 transformadores de fuerza y uno de alumbrado.

Inicialmente se realiza el análisis comparativo entre ambas conexiones, incluyendo la pérdida de energía en el banco y posteriormente se evalúa la influencia de la línea y sus pérdidas.

Se observa que en la medida que la longitud de la línea se incrementa se hace más pequeña la zona de utilización de la conexión incompleta.

Sin embargo a incrementos del voltaje nominal aumenta la zona de utilización del banco incompleto.

Se muestra la expresión para el análisis de la factibilidad económica de sustituir los bancos completos en explotación por conexiones incompletas.

BIBLIOGRAFÍA

1. Casas, L: Sistemas Electroenergéticos, “Apuntes para un libro de texto”. Tomo I y II. MES, UCLV, Santa Clara, 1982.
2. Korotkievich, M.A.: Optimización en la explotación de circuitos de distribución, MINSK, 1984. (En Ruso)
3. Korotkievich, M.A: y Traviaanski M.Y.: Perfeccionamiento en la explotación de redes eléctricas de ciudades, Sta bropol, 1987, (En Ruso).
4. Fernández, L: “Evaluación financiera de proyectos energéticos”. Seminario de economía de la energía CEPAL – Ministerio de Economía y Planificación de Cuba. La Habana, Febrero, 1997.

