

Resultados de la aplicación de los Transformadores Pad Mounted en el Sistema de Distribución de la Empresa Eléctrica Quito S.A.

Ing. Alexandra Llumigusín Sarzosa

Ing. Fausto Avilés Merino, MSc

Facultad de Ingeniería Eléctrica y Electrónica, Escuela Politécnica Nacional

jackeline_146@hotmail.com

fausto.aviles@yahoo.com

Abstract— Este documento contiene un análisis detallado de los transformadores tipo pedestal del sistema de distribución de la Empresa Eléctrica Quito S.A. Debido a que, a pesar de cumplir con las normas, en la EEQ S.A. se tiene un alto porcentaje de transformadores tipo pedestal, específicamente con el grupo de conexión Yyn0, averiados mucho antes de cumplir con su vida útil; el objetivo de este proyecto ha sido determinar las causas de las averías presentadas en estos transformadores, para así poder establecer posibles soluciones a los problemas encontrados y evitar que los transformadores continúen averiándose.

Se incluye un resumen de los datos estadísticos recopilados y las pruebas de laboratorio realizadas, los cuales han sido fundamentales para establecer las causas de las averías y posteriormente dar soluciones factibles tanto técnica como económicamente.

Index Terms — Alto voltaje, Distribución, Transformador.

I. INTRODUCCIÓN

Es necesario realizar una investigación profunda sobre los transformadores pad mounted (tipo pedestal) debido a los problemas que se han presentado en su funcionamiento.

En la EEQ S.A. se han presentado inconvenientes con el uso de transformadores tipo pedestal del grupo de conexión Yyn0. A pesar de cumplir con las normas establecidas, un alto número de transformadores tipo pedestal de conexión Yyn0 sufren daños que imposibilitan la continuidad de su servicio, lo que conlleva a la EEQ S.A. a invertir en recursos (económicos y humanos) para el restablecimiento del sistema. Es por ello que la EEQ S.A. ha tratado de buscar soluciones factibles, en términos técnicos y económicos, para este problema sin tener éxito.

En nuestro país no existen muchos estudios acerca de los transformadores tipo pedestal. Actualmente el Instituto Ecuatoriano de Normalización (INEN) contiene entre sus proyectos la realización de una norma dedicada exclusivamente a transformadores trifásicos tipo pedestal. La información con la que se cuenta, y las normas bajo las cuales se manejan las

empresas eléctricas son en su mayoría americanas (ANSI) e internacionales (IEEE), pero no debemos olvidar que nuestros sistemas de distribución no siempre operan bajo las mismas condiciones, lo que significa que dichas normas deberán acoplarse a nuestra realidad.

Por las razones antes mencionadas es de vital importancia realizar un análisis sobre los transformadores tipo pedestal, en concreto sobre el grupo de conexión Yyn0, pues la EEQ tiene la necesidad de contar con un estudio técnico detallado sobre la operación de este tipo de transformadores; así como encontrar las causas de los problemas que se presentan y con ello proponer una solución factible que pueda ser aplicada en el sistema de distribución de la Empresa Eléctrica Quito.

II. TRANSFORMADORES TIPO PEDESTAL

A. Definición

Un transformador pad mounted o tipo pedestal es un transformador, construido en una cabina de acero cerrada, la cual estará montada sobre una plataforma de concreto, de allí su nombre en inglés[1]. La cabina metálica deberá estar sólidamente aterrizada. De esa forma todos los puntos que se puedan encontrar energizados estarán encerrados en dicha cabina. Por esta razón este tipo de transformadores son utilizados en redes subterráneas, pues los conductores entrarán al transformador por la parte inferior del mismo[2]. En la fig. 1 se puede apreciar un transformador tipo pedestal instalado de la EEQ S.A.

Los transformadores tipo pedestal pueden ser monofásicos o trifásicos y generalmente son de bajas potencias (kVA). Son utilizados principalmente en sistemas de distribución, para reducir el voltaje de los alimentadores primarios del sistema (6300 V y 22 860V en el caso de la EEQ S.A.) al voltaje de servicio de las redes secundarias (210V/121V o 220/127 en EEQ S.A.).



Fig. 1 Transformador Pad Mounted de la EEQ S.A.

B. Aplicaciones

Existen dos razones principales para elegir el uso de transformadores tipo pedestal sobre los transformadores convencionales. El primer factor es la estética y seguridad, como por ejemplo en lugares turísticos. El segundo factor es el espacio, pues existen lugares en donde no se dispone del suficiente espacio para construir una cámara de transformación convencional.

Los transformadores tipo pedestal se utilizan principalmente en zonas comerciales, escuelas, alumbrado público, edificios, centros comerciales, y diversas aplicaciones en instalaciones industriales.

III. DATOS ESTADÍSTICOS

Los transformadores trifásicos de la EEQ S.A. tienen principalmente dos grupos de conexión: Dyn5 para los transformadores convencionales y transformadores tipo pedestal de 6300V; y Yyn0 para los transformadores tipo pedestal de 22860V.

A. Transformadores Trifásico Dyn5

Desde el año 2006 hasta el año 2013 se tiene un total de 138 unidades instaladas.

La EEQ S.A. no tiene ningún registro sobre transformadores tipo pedestal con conexión Dyn5 averiados.

Lo que quiere decir que los transformadores tipo pedestal con conexión Dyn5 no han presentado problemas en su operación, y continúan funcionando normalmente.

B. Transformadores Trifásico Yyn0

Desde el año 2005 hasta el año 2013 se tiene un total de 142 unidades instaladas en las redes de la EEQ S.A.

De acuerdo a los datos recopilados, se tienen 21 unidades que fallaron, detalladas en la Tabla 1, frente a 142 unidades instaladas, lo que significa que un 14.8 % de los transformadores instalado tipo pedestal de conexión Yyn0 se han averiado, todos antes de cumplir con su vida útil.

Según un informe de la EEQ S.A., se tiene que un 99% de las unidades han fallado por ausencia de energía en una de sus

fases, lo cual ha producido un recalentamiento del tanque. Según dicho informe, la causa de este problema es el fenómeno de ferresonancia, el cual se analizará más adelante.

TABLA I
TRANSFORMADORES TRIFÁSICOS YYN0 DE LA EEQ AVERIADOS

POTENCI A kVA	No. EMPRESA	MARCA	AÑO FAB	AÑO FALLA
100	116014-C	RYMEL	2003	2010
75	115974-C	ECUATRAN	2003	2005
75	115975-C	ECUATRAN	2003	2006
300	116069-C	ECUATRAN	2002	2004
250	116001-C	ECUATRAN	2003	2010
150	37227-C	RYMEL	1999	2005
100	166332-C	INATRA	2009	2012
150	164060-C	ECUATRAN	2006	2009
50	41684-E	ECUATRAN	2008	
1000	161731-C	ECUATRAN	2003	2009
50	166233-C	ECUATRAN	2009	2010
100	40902-C	ECUATRAN	2006	2007
30	162880-C	AICO	2005	2008
F	115970-C	ECUATRAN	2003	2008
200	115616-C	ECUATRAN	2003	2008
75	116129-C	ECUATRAN	2003	2004
150	37226-E	RYMEL	1999	2005
150	37227-E	RYMEL	1999	2005
150	37228-E	RYMEL	1999	2005
50	166908-C	ECUATRAN	2006	2013
1000	161731-C	ECUATRAN	2003	2014

Además, se observa que de los 21 transformadores averiados 13 unidades son de marca ECUATRAN, 2 de marca INATRA y 6 de otras marcas, frente a 30 transformadores ECUATRAN instalados, 76 INATRA instalados y 36 de otras marcas. Lo que muestra que en su mayoría se averían transformadores de marca ECUATRAN.

Todos los transformadores de la EEQ S.A.; convencionales y tipo pedestal de conexión Yyn0 o Dyn5, se encuentran operando bajo las mismas condiciones de servicio, es decir, todos experimentan ausencia de energía en una de sus fases cuando se presentan fallas monofásicas. Sin embargo, el único transformador que ha presentado problemas bajo esta condición ha sido el transformador de conexión Yyn0. Por esta razón en los siguientes capítulos se analizará a fondo este tipo de transformador.

IV. PRUEBAS DE LABORATORIO

A. Pruebas de Laboratorio realizadas

Se realizaron tres pruebas para observar los efectos producidos ante la ausencia de energía en una de las fases del transformador con conexión Yyn0.

Primero se realizaron pruebas en transformadores con núcleos de 3 columnas. Los esquemas de estas pruebas se muestran en la fig. 2. La primera prueba fue realizada sin ninguna carga conectada al transformador, es decir, en vacío. La segunda prueba realizada fue con carga en el lado secundario del transformador. Finalmente se realizó una prueba con una carga trifásica en el lado secundario del transformador, y otra carga trifásica antes del transformador, para simular un pequeño sistema de distribución.

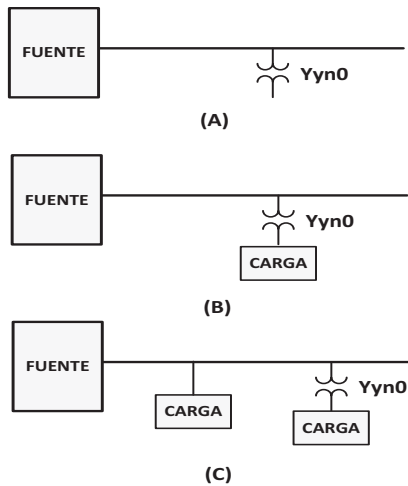


Fig. 2 Esquema de conexiones para Pruebas

Al realizar las pruebas los datos muestran que ante la ausencia de energía en una de las fases del transformador, la conexión Yyn0 genera dicha fase, tal como se muestra en la Tabla 2.

TABLA II
RESUMEN DATOS PRUEBAS REALIZADAS 3 COLUMNAS

% Carga	Voltaje con 3 Fases (V)	Voltaje sin 1 fase (V)	% Volt. Induce
0 %	123.4	121.7	98.6 %
26 %	110.6	87.2	78.8 %
52 %	108.9	70.4	64.6 %
26% +12%(antes)	113.9	81.3	71.4 %

Al realizar las pruebas se observó que:

*Cuando un transformador trifásico con núcleo de tres columnas tiene una conexión Yyn, al existir una ausencia de energía en una de sus fases, se genera el voltaje en dicha fase.

*Aún con una fase faltante, el transformador continúa alimentando a su carga trifásica, con las fases energizadas y la fase inducida.

*En la tercera prueba, cuando una fase estaba desenergizada, el voltaje inducido por el transformador permitía que la carga conectada antes del transformador reciba una alimentación trifásica.

*Por motivo de costos las pruebas fueron realizadas en un transformador pequeño de aproximadamente 2 KVA, sin embargo por experiencias en sitios donde se encontraba instalado transformadores de distribución (400 KVA) se sabe que este fenómeno se refleja de manera diferente. El voltaje se induce casi al 100% hasta una cargabilidad de aproximadamente 35% y en un 80% hasta un cargabilidad del 50%.

También se realizaron pruebas con un transformador trifásico con núcleo de cinco columnas.

En la Tabla 3 se muestran el porcentaje de voltaje inducido en la fase desenergizada.

TABLA III
RESUMEN DATOS PRUEBAS REALIZADAS 5 COLUMNAS

Carga	Voltaje con 3 Fases (V)	Voltaje sin 1 fase (V)	% Volt. Induc.
0	124.8	57.5	46.07 %
21 A	118	60	50.84 %

Se observa que a diferencia del transformador con núcleo de 3 columnas el voltaje no se induce al 100%, sino aproximadamente a un 50%. Además al conectar carga estos porcentajes no varían significativamente.

B. Pruebas Transformadores Averiadados EEQ S.A.

En la EEQ S.A. únicamente se han hecho pruebas a tres transformadores tipo pedestal de conexión Yyn0. A continuación se muestran los reportes de las pruebas realizadas por el Laboratorio de Transformadores de la EEQ S.A.

REPORTE DE UN TRANSFORMADOR TIPO PEDESTAL INATRA

El transformador sale de servicio por reporte de ausencia de voltaje en sus fases. El núcleo del transformador es de 5 columnas.



Fig. 3 Transformador averiado INATRA

De las pruebas realizadas y el estado físico del transformador se llega a la conclusión que el núcleo sufrió daños significativos, probablemente provocados por un exceso de temperatura.

REPORTE DE UN TRANSFORMADOR TIPO PEDESTAL AICO



Fig. 4 Transformador averiado AICO

El transformador sale de servicio por presentar un recalentamiento en su parte frontal. Se reporta ausencia de voltaje en una de sus fases. El núcleo del transformador es de 5 columnas.

Al realizar la prueba en vacío (pérdidas en el núcleo), existe un disparo de la corriente; debido a problemas en el núcleo, como se puede observar en la fig. 4 las láminas del núcleo se encuentran separadas entre sí.

REPORTE DE UN TRANSFORMADOR TIPO PEDESTAL RYMEL

El transformador sale de servicio por incendio del mismo en su parte frontal. Se evidencia el origen del fuego en el terminal de entrada H1.



Fig. 5 Transformador averiado RYMEL

De acuerdo a las pruebas realizadas y el estado físico del transformador se llegó a la conclusión que el daño se produjo por una mala instalación de uno de los terminales de medio voltaje H1.

OBSERVACIONES

En los transformadores INATRA y AICO, se ha presentado un daño en los núcleos de los transformadores. En ambos casos se tiene una elevada corriente de magnetización de una de las fases. En la fig. 3 se puede observar pequeñas separaciones entre las láminas del núcleo, y en la fig. 4 se observa que estas separaciones son mucho mayores. Todo lo antes mencionado, hace inferir que los problemas que se presentan con los transformadores tipo pedestal con conexión Yyn0, afectan principalmente al núcleo.

V. ANÁLISIS DE LOS PROBLEMAS PRESENTADOS

A. Generación De Voltaje

NÚCLEO DE 3 COLUMNAS

En la fig. 6 se muestra un transformador trifásico de tres columnas, con dos devanados en cada columna y sus respectivos flujos magnéticos. En la fig. 7 se puede observar el circuito magnético equivalente al transformador trifásico de tres columnas.

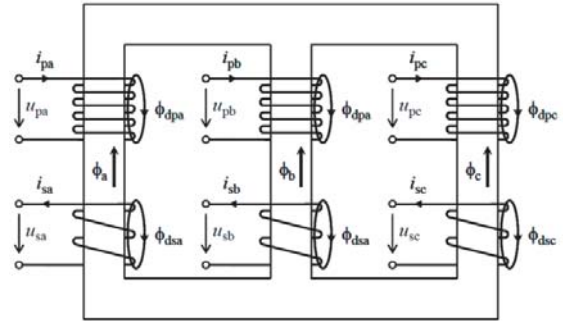


Fig. 6 Transformador de Tres Columnas[3]

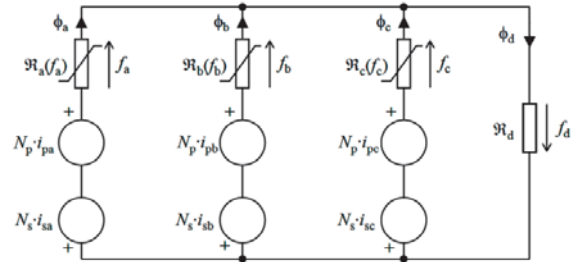


Fig. 7 Circuito Magnético de un transformador de tres columnas [3]

En donde para k=a, b, c:

- $N_p \cdot i_{pk}$: Fuerza magnetomotriz del primario, fase k
- $N_s \cdot i_{sk}$: Fuerza magnetomotriz del secundario, fase k
- f_k : Fuerza magnetomotriz de la columna k
- $\mathfrak{R}_k(f_k)$: Reluctancia no lineal de la columna k del núcleo, dependiente de f_k
- Φ_k : Flujo Magnético que atraviesa la columna k
- \mathfrak{R}_d : Reluctancia constante del aceite que rodea al núcleo del transformador.

La parte d del circuito representa el circuito de dispersión que se cierra a través del aceite, por lo que la reluctancia \mathfrak{R}_d corresponde a la reluctancia del aceite del transformador y se considerará como un valor constante.

El circuito equivalente de la fig. 7 cumple las siguientes relaciones:

$$\begin{aligned} \phi_a + \phi_b + \phi_c &= \phi_d & Ec. 1 \\ N_p \cdot i_{pk} - N_s \cdot i_{sk} - f_k &= f_d \end{aligned}$$

Para k = a, b, c

Se considerará el caso en el que el transformador se encuentre en vacío, es decir debido que el lado secundario estará abierto, no circulará ninguna corriente por el secundario ($i_{sa} = i_{sb} = i_{sc} = 0$), por lo que la fmm del secundario también será cero.

Si se desconecta la alimentación de la fase C del transformador de conexión Yyn, la alimentación de los devanados de las columnas A y B no se verá afectado, es decir seguirán alimentados con sus respectivos voltajes fase-neutro. Entonces se tendría que:

$$\begin{aligned} N_p \cdot i_{pc} &= 0 \\ N_p \cdot i_{pa} &\approx N_p \cdot i_{pb} \neq 0 \end{aligned}$$

Reemplazando se tendrá que:

$$-f_c = f_d$$

Se sabe que: $f_{mm} = \mathfrak{R} \cdot \phi$

Entonces:

$$-\mathfrak{R}_c(f_c) \cdot \phi_c = \mathfrak{R}_d \cdot \phi_d$$

$$\phi_d = -\frac{\mathfrak{R}_c(f_c)}{\mathfrak{R}_d} \cdot \phi_c$$

La permeabilidad magnética (μ) del aceite siempre será mucho menor a la del núcleo laminado del transformador, y siendo $\mathfrak{R} = \frac{1}{\mu \cdot A}$ se tiene que:

$$\mathfrak{R}_d \gg \mathfrak{R}_c(f_c)$$

Al cumplirse esta relación entre las reluctancias, también se cumplirá que:

$$\frac{\mathfrak{R}_c(f_c)}{\mathfrak{R}_d} \rightarrow 0$$

Por lo que, $\phi_d \rightarrow 0$

De acuerdo a la ecuación 1, esto significaría que:

$$\phi_a + \phi_b + \phi_c = 0$$

Despejando ϕ_c :

$$\phi_c = -(\phi_a + \phi_b)$$

En la fig. 8 se muestra fasorialmente la ecuación anterior.

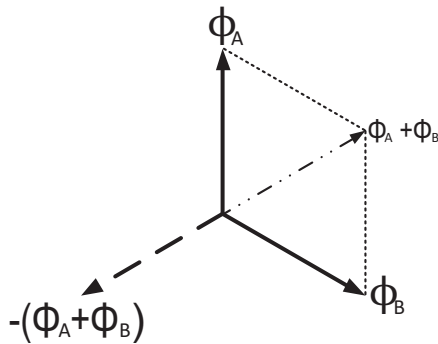


Fig. 8 Diagrama Fasorial de la Fase Inducida, 3 Columnas

Como se puede observar al desenergizar la fase C, se tendrá que por la columna C fluirá un flujo de igual magnitud al de las columnas A y B, con un desfase de 120° respecto a A. Este flujo resultante genera un voltaje igual al nominal en los devanados de la columna C, tanto en el primario como en el secundario; tal como se ha demostrado en las pruebas de laboratorio.

Cuando se conecta carga al transformador, éste continúa alimentándola trifásicamente con las dos fases energizadas y la fase generada, creando así una corriente secundaria en la fase no energizada.

Además, al generarse voltaje en la fase desenergizada, cercano al 100% se produce un problema grave dentro del transformador. En la práctica, una falla en el sistema de distribución que conlleve a la pérdida de una fase, se produce en cualquier punto del sistema. En la fig. 9 se muestra un

diagrama unifilar similar al de un sistema de distribución.

Si ocurre una falla monofásica en el punto A, el sistema tendrá únicamente dos fases energizadas aguas abajo del punto A. El transformador tipo pedestal de conexión Yyn0 generará el voltaje de la fase desenergizada tanto en su primario como en su secundario, lo que significa que todos los demás transformadores conectados por el sistema de distribución al transformador tipo pedestal, también tendrán voltaje en la fase desenergizada.

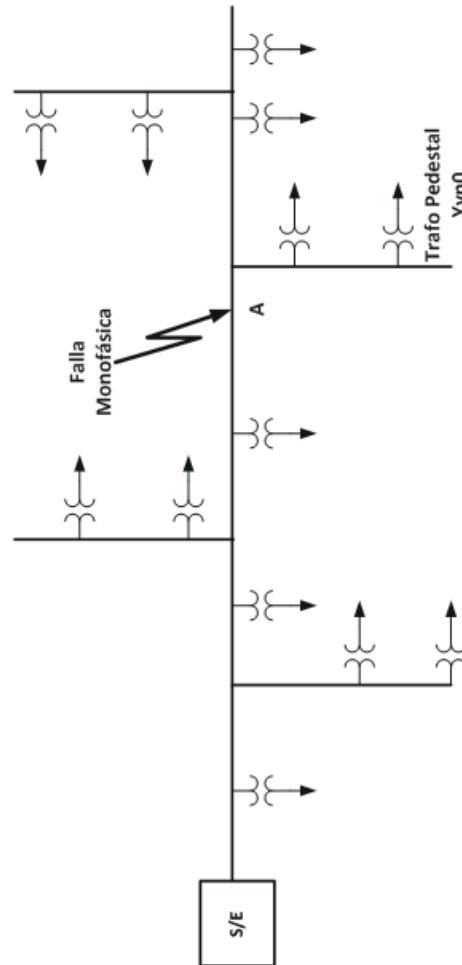


Fig. 9 Ejemplo de un Sistema de Distribución

Este fenómeno de generación de voltaje hace que el transformador tipo pedestal alimente parcialmente al resto de la carga del sistema aguas abajo del punto de falla y conectada en el lado primario al transformador tipo pedestal.

Consideremos que se tiene una carga trifásica equilibrada conectada al transformador, al generarse voltaje en la fase no energizada el transformador continúa alimentado a su carga y se tendrá una corriente en el lado secundario de la fase no energizada. Esta corriente induce un flujo magnético en el núcleo del transformador, puesto que el primario no está conectado este flujo deberá ser compensado por $N_p \cdot i_{pa}$ y $N_p \cdot i_{pb}$, pero estas corrientes también deben compensar los flujos creados por las corrientes secundarias de sus respectivas fases. Esto hará que los flujos netos que fluyen por cada una de las

columnas sean mayor al flujo creado por la corriente de magnetización (condiciones normales).

Si además de la carga del transformador, éste también alimenta a las cargas del sistema de distribución a través del lado primario, se tendrá también una corriente en el lado primario de la fase no energizada. Puesto que esta corriente “sale” del transformador generará un flujo en la misma dirección que el flujo creado por la corriente secundaria. Esto quiere decir que ahora las corrientes i_{pa} y i_{pb} deberán también compensar el flujo creado por la corriente del primario, aumentando el desequilibrio de flujos del caso anterior, y con ello el flujo neto que fluye por cada columna.

El problema que se presenta en este tipo de transformadores es debido a que cuando el flujo neto que fluye por cada una de las columnas del transformador aumenta, también aumentarán las corrientes de Foucault o corrientes parásitas en el núcleo del transformador. Estas corrientes causarán un recalentamiento gradual del núcleo, que puede llegar a separar las chapas laminadas del núcleo, este efecto se puede observar en la fig. 4 del “REPORTE DEL TRANSFORMADOR AICO” entregado por la EEQ S.A.

Como se observa los problemas generados por la falta de fase, se producen al interior del transformador. En el lado secundario, el transformador esta alimentado únicamente a su carga, esto significa que las corrientes secundarias siempre serán iguales o menores a la corriente nominal del transformador, y las protecciones del lado secundario no operará. En el lado primario se crea un gran desequilibrio en las corrientes, lo cual hace que las corrientes netas entregadas por las fases energizadas no siempre superen los valores nominales, por lo que estas protecciones tampoco operan.

NÚCLEO DE 5 COLUMNAS

En la fig. 10 se muestra un transformador trifásico de cinco columnas, con dos devanados en cada columna y sus respectivos flujos magnéticos. [3]

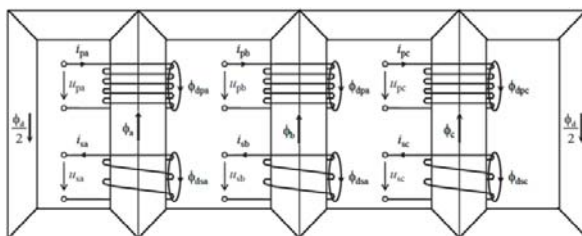


Fig. 10 Transformador de Cinco Columnas[3]

Al realizar un análisis similar al realizado para el núcleo de tres columnas, se demostró que cuando se desenergiza una fase cualquiera, las otras dos inducen un flujo magnético en la fase desenergizada igual a la mitad del que existiría si dicha fase se encontrara energizada. Este flujo resultante generará un voltaje igual a la mitad nominal en los devanados de la fase desenergizada, tanto en el primario como en el secundario; tal como se ha demostrado en las pruebas de laboratorio.

En el caso de transformadores con núcleos de cinco columnas, cuando se induce la mitad del voltaje nominal, se

tendrá el caso similar al explicado anteriormente, pero en este caso el transformador tipo pedestal alimentará a la fase desenergizada del resto de la carga con la mitad de su voltaje nominal. Dependiendo del tipo de cargas conectadas, se tendrán tres casos: cargas de aparatos eléctricos que generalmente no funcionarán con voltajes inferiores al nominal y la potencia consumida será mínima, cargas resistivas que consumirán la mitad de la potencia, y motores que en ciertos casos tratarán de compensar la reducción del voltaje aumentando la corriente para consumir la potencia nominal (esto puede llegar a dañar a los motores). Debido a esto, aun cuando la potencia que se exige al transformador de 5 columnas es menor que si se tuviera un transformador de 3 columnas, se repetirá el fenómeno anterior donde se crea un desequilibrio de los flujos magnéticos, lo cual hace que los flujos netos que fluyen a través de cada columna aumenten y con ello aumenten las corrientes parásitas que empiezan a recalentar el núcleo del transformador.

Conexión Dyn5

Cuando se utiliza este grupo de conexión, los transformadores son construidos únicamente con núcleos de tres columnas.

Se considera que el transformador se encuentra en vacío, es decir, $i_{sa} = i_{sb} = i_{sc} = 0$. Si se desenergiza cualquiera de las fases del transformador, se estará desconectando la alimentación de dos de sus devanados, es decir, solo se estaría alimentando a uno de los tres devanados del transformador. Esto significa que debido a que el único flujo existente es el flujo ϕ_a , inducido por el voltaje VAB, éste se cerrará a través de las columnas B y C. Es posible que estos nuevos flujos ϕ_c y ϕ_b generen voltajes en los devanados BC y CA, pero debido al gran desequilibrio existente, estos voltajes generados también serán bastante desbalanceados, tanto en magnitud como en ángulo. Esto hace muy improbable que las cargas conectadas en las fases no energizadas, sobre todo las cargas trifásicas, puedan alimentarse con estos voltajes.

B. Recalentamiento del Tanque

NÚCLEO DE 3 COLUMNAS

Este tipo de núcleo se basa en el principio de que se tendrá un sistema trifásico equilibrado, en el cual el flujo residual será cero. Por lo cual en el núcleo de tres columnas no se tiene un camino magnético de retorno para cualquier flujo residual.

Si en el núcleo de tres columnas se generan flujos de secuencia cero, estos buscarán un camino de retorno, de un yugo al otro, a través del aceite, del tanque y de las estructuras de sujeción del núcleo. [5] [5] [6]

Si los flujos de secuencia cero se cierran a través de las paredes del tanque, existirá un flujo rodeado por la superficie del tanque. Este flujo inducirá una corriente en las paredes del tanque. Puesto que el tanque tendría solo 1 vuelta, las corrientes inducidas pueden ser varias veces las corrientes de secuencia cero que normalmente circulan por los devanados del transformador. El tanque del transformador no se encuentra diseñado para soportar ese tipo de corrientes y si el flujo de

secuencia cero aumenta demasiado, las corrientes inducidas causarán un grave recalentamiento en cuestión de segundos. En algunos casos las temperaturas llegan a ser tan altas que destruyen la pintura del tanque. [1] [5] [6]

NÚCLEO DE 5 COLUMNAS

A diferencia del núcleo de tres columnas, el núcleo de cinco columnas si presenta un camino magnético de retorno para flujos residuales. Por lo que cualquier flujo residual, ya sea provocado por corrientes de secuencia cero o desbalance de flujos por la falta de una fase se cerrará a través de estas columnas y no del tanque, ni el aceite del transformador. Es por ello que al utilizar este tipo de núcleo se evita el problema de sobrecalentamiento del tanque.

VI. CONEXIÓN DYN5 VS. YYN0

Debido a que los reportes de la EEQ S.A. muestran que los transformadores con conexión Dyn5 han operado normalmente, se analizará la factibilidad de no utilizar más la conexión Yyn0, y reemplazarla por la conexión Dyn5, para así solucionar el problema de los transformadores quemados.

Se analizó el comportamiento de cada grupo de conexión respecto a: la presencia de cargas desbalanceadas y armónicos, los costos y el fenómeno de ferresonancia. En los tres primeros casos se tiene una mejor respuesta con la conexión Dy.

A. FERRORESONANCIA

Los transformadores tipo pedestal son diseñados para sistemas de distribución subterráneos, lo cual hace que la capacitancia que aportan los conductores aumente. Debido a las altas capacitancias de los cables, la probabilidad de ocurrencia de ferresonancia aumenta en sistemas de distribución subterráneos.

La ferresonancia es un tipo especial de resonancia serie, por lo que es importante primero entender cuándo se puede producir este tipo de resonancia. La resonancia serie se puede producir en circuitos series $R - L - C$, en donde se tenga una resistencia despreciable. Si las magnitudes de reactancia inductiva y capacitiva se acercan, debido a que son opuestas, se anularán entre ellas, y la impedancia total vista por la fuente será muy baja, provocando corrientes elevadas. Estas corrientes elevadas pueden provocar sobrevoltajes tanto en el inductor como en el capacitor. [7] [8]

Conexión Triángulo – Estrella

En la fig. 11 se observa que en la conexión Dy es posible que se forme un circuito $L - C$ donde es probable que ocurra la ferresonancia.

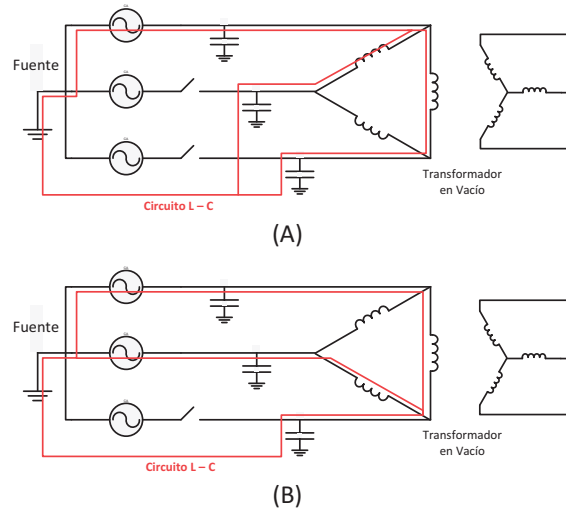


Fig. 11 Transformador D-y (A) Con una fase energizada (B) Con dos fases energizadas [7]

Conexión Estrella – Estrella

La fig. 12 muestra los circuitos que se forman en un transformador con conexión Estrella – Estrella con neutro sólidamente aterrizado en el lado primario. Se puede observar que en el lado primario no se forma el circuito necesario para que pueda ocurrir ferresonancia.

Por ello la mejor configuración para evitar la ferresonancia sería Estrella – Estrella con el neutro aterrizado en ambos lados. [8]

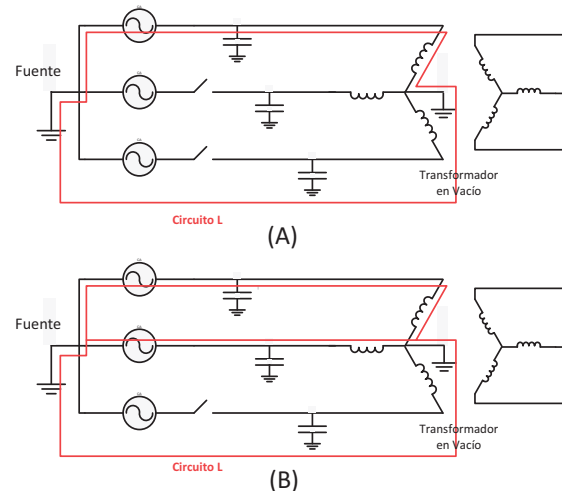


Fig. 12 Transformador Y aterrizada – y (A) Con una fase energizada (B) Con dos fases energizadas [9]

Un factor importante que se debe considerar es el nivel de voltaje, a mayor voltaje mayores son las capacitancias de los cables y mayor será la probabilidad de que ocurra el fenómeno de ferresonancia. La tabla 4 corresponde a la norma IEEE C57.12.26, esta nos indica que hasta 16 340 V se puede usar la

conexión Dy o Yy, pero que a partir de 22 860 V se debe utilizar únicamente la conexión Yy aterrizada.

Tabla 4 Rango de kVA y Voltajes Nominales [8]

Altos – Voltajes Nominales (V)	kVA Nominales	
	Bajos – Voltajes Nominales (V) 208Y/120, 240	Bajos– Voltajes Nominales (V) 480Y/277, 480
Delta o Estrella		
2400	75 – 750	75 – 750
4160	75 – 1000	75 – 1000
4800	75 – 1000	75 – 1500
7200	75 – 1000	75 – 2000
12 000, 12 470	75 – 1000	75 – 2500
13 200, 13 800, 16 340	75 – 1000	75 – 2500
Estrella Aterrizada		
22 860, 23 900, 24 490	75 – 1000	75 – 2500
34 500	75 – 1000	75 – 2500

NOTA:
Los Kilovoltios-amperios nominales separados por un guion indican que todos los valores nominales intermedios que se cubren en esta norma están incluidos.
Cargas desequilibradas de unidades conectas en Estrella-Estrella pueden causar un calentamiento de sus tanques en exceso, mayor del que existiría bajo condiciones balanceadas. Para reducir la probabilidad de calentamiento del tanque, estas unidades deben tener un núcleo que no se saturate cuando se aplique un 33% del voltaje de secuencia cero.

Luego de realizar un análisis sobre las ventajas y desventajas que presenta cada conexión se observa claramente que no es factible que la conexión Dy5 reemplace a la conexión Yyn0, pues a pesar de las muchas ventajas que tiene, a niveles de voltaje de 22 860V o superiores aumenta la probabilidad de que se presenten sobrevoltajes debido a la ferresonancia y es necesario una configuración que minimice al máximo la probabilidad de que esto ocurra. Por lo tanto para sistemas subterráneos se debe utilizar la conexión Estrella – Estrella con el neutro aterrizado en ambos lados, cuando los niveles de voltaje sean igual o mayores a 22 860V.

VII. SOLUCIONES PROPUESTAS

A. Detección de falta de fase

En el presente trabajo se propone instalar un sistema de control automático que pueda monitorear si existe una falta de energía en cualquiera de las fases y, si ese es el caso, desconecte al transformador de la red. Este sistema continuará monitoreando y reconectara al transformador cuando detecte energía en las tres fases, similar a un tablero de transferencia.

Un factor importante es el costo que tendría implementar este sistema de detección de fase. A continuación se detallará los costos aproximados extras que se tendrán con la instalación propuesta. Para este sistema es necesario una celda de media tensión motorizada, la cual tiene un costo aproximado de \$17800, esta celda eleva considerablemente el costo de implementar este sistema de detección.

La instalación de este sistema es necesario debido a que el sistema de distribución de la EEQ S.A. no maneja mandos tripolares, por lo que cuando se producen fallas monofásicas, es posible tener dos o solo una de las fases energizadas.

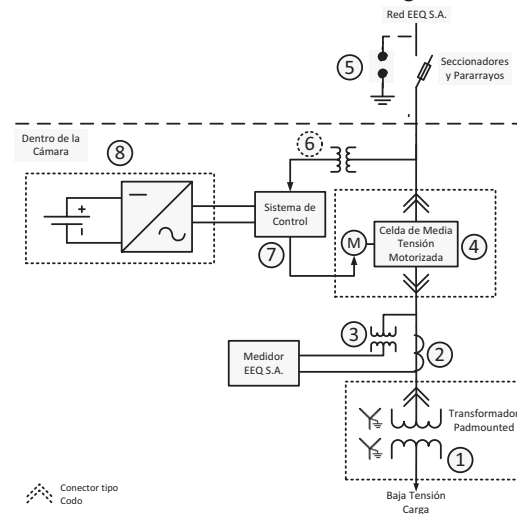


Fig. 13 Diagrama Instalación Propuesta Transformador Padmounted Yyn0

B. Transformador Convencional

Debido al elevado costo que tendría instalar un transformador tipo pedestal con un sistema de detección de falta de fase, se propone instalar una cámara con un transformador convencional, pues mucho más económico

Estas soluciones son necesarias, pues bajo las condiciones de operación del sistema de distribución de la EEQ S.A. es posible que el sistema alimente a los transformadores con dos o solo una fase.

Si, bajo las condiciones de servicio de la EEQ S.A., al instalar un transformador tipo pedestal no se cumple con los principales objetivos que son reducir el costo y el espacio de una cámara de transformación, no se justificaría el uso de estos transformadores. Igualmente, económicamente resulta mucho

más factible instalar una cámara de transformación convencional, que un transformador tipo pedestal.

VIII. CONCLUSIONES

Los transformadores tipo pedestal Yyn0 con un núcleo de tres columnas se han averiado debido a que cuando existe ausencia de energía en una de sus fases, se genera casi el 100% del voltaje nominal en la fase no energizada, en bajo y medio voltaje. Este voltaje generado, es capaz de alimentar las cargas del transformador y del sistema de distribución conectados a la fase desenergizada; cuando esto ocurre dentro del transformador se crea un desbalance significativo de flujos magnéticos. Este desbalance causa que aumente tanto el flujo neto de cada columna, que a su vez produce un aumento de corrientes parásitas, causantes de un recalentamiento gradual del núcleo; como el flujo neto residual, el cual busca un camino para cerrarse, a través del aceite y del tanque produciendo así un recalentamiento del tanque.

Luego de realizar un análisis del fenómeno de ferresonancia, se concluye que esta no es la causa por la cual se averían los transformadores tipo pedestal con conexión Yyn0. Por el contrario para minimizar al máximo la probabilidad de que ocurra este fenómeno se debe utilizar la configuración Yy con ambos neutros correctamente aterrizados.

Para evitar que los transformadores tipo pedestal con conexión Yyn0 sigan dañándose debido a la ausencia de energía en una de sus fases es necesario implementar un sistema que detecte esta condición y desconecte la alimentación del transformador, que debe contar con una celda de media tensión instalada en una cámara de transformación.

No se justifica el uso de transformadores tipo pedestal con conexión Yyn0 instalados dentro de una cámara de transformación, pues su propósito principal es el de poder instalarse en lugares accesibles al público y reducir el espacio que ocupan las cámaras de transformación convencionales.

En otros lugares no se han presentado los problemas que ha sufrido la EEQ S.A. debido a que sus sistemas no permiten la continuidad del servicio con dos o solo una fase. Bajo esas condiciones no es necesario instalar la celda de media tensión, y por ende se evita el uso de la cámara de transformación, resultando más económico instalar transformadores tipo pedestal que los convencionales.

REFERENCIAS

- [1] Catálogo Técnico "Transformadores Tipo Pedestal" PROLEG
- [2] Catálogo "Transformadores", 2010. PROMELSA.
- [3] Luis Guasch. "Modelo del Transformador Trifásico". [En línea] Disponible: <http://www.tdx.cat/bitstream/handle/10803/6303/02Lgp02de02.pdf;jsessionid=CFBFB05F82F520A0698B88DC729E1C5C.tdx?sequence=2>.
- [4] Bean, Richard, y otros. "Transformadores para la Industria Eléctrica". Primera Edición, Editorial Continental, México, 1963.
- [5] Winders, John. "Power Transformers: Principles and Applications", First Edition, Marcel Dekker Inc. Ed., United States of America, 2002.

- [6] McNutt, W. 1976. "Application of distribution and Power Transformers" New York: IEEE, 1976.
- [7] Aponte, Guillermo "La ferresonancia en transformadores de distribución" Universidad del Valle, Colombia. 2010.
- [8] González, O.; Hernández L.; "Aislamiento en Sistemas de Media Tensión ante Fenómenos por Ferresonancia" Trabajo Especial de Grado, Universidad de Carabobo, Venezuela. Diciembre. 2008.
- [9] Rymel. "Ferresonancia". [En línea] Disponible: <http://rymelcr.net/InforFerresonancia.html>.
- [10] IEEE Standard C57.12.26 – 1992 – IEEE Standard for Pad-Mounted, Compartmental-Type, Self-Cooled, Three-Phase Distribution Transformers for Use with Separable Insulated High-Voltage Connectors (34 500 GrdY/19 920 Volts and Below, 2500 kVA and Smaller)

BIOGRAFÍAS



Alexandra Llumigús Sarzosa, nació en Londres, Reino Unido, el 11 de febrero de 1991. Realizó sus estudios secundarios en la Unidad Educativa "INEPE" de la ciudad de Quito, obteniendo el título de Bachiller en Físico Matemático, 2008. Se graduó en la Escuela Politécnica Nacional como Ingeniera Eléctrica en 2014. Actualmente trabaja como

Técnico Docente en la EPN. Sus áreas de interés son: máquinas eléctricas, sistemas de distribución.



Fausto Guillermo Avilés Merino.- Ingeniero Eléctrico en Sistemas Eléctricos de Potencia de la Escuela Politécnica Nacional 1978. Título de PROFESOR Escuela Politécnica Nacional 2003, Magister en Ingeniería Industrial y Productividad MSc. 2007. Coordinador de la Carrera de Ingeniería Eléctrica 2011-2013. Actualmente Profesor

Principal a tiempo completo.