

TRANSFORMADORES TRIFASICOS

Carlos Tepan Pintado, Universidad Politécnica Salesiana, Cuenca, Ecuador.

Abstract—Transformador o trafo (abreviatura), es un dispositivo eléctrico que permite aumentar o disminuir la tensión en un circuito eléctrico de corriente alterna, manteniendo la frecuencia. La potencia que ingresa al equipo, en el caso de un transformador ideal (sin pérdidas), es igual a la que se obtiene a la salida. Las máquinas reales presentan un pequeño porcentaje de pérdidas, dependiendo de su diseño, tamaño.

Index Terms—Concéntrico, Oxidación, Rigidez Dieléctrica, Aceites Aislantes.

I. INTRODUCCIÓN

El transformador es un dispositivo que convierte la energía eléctrica alterna de un cierto nivel de tensión, en energía alterna de otro nivel de tensión, por medio de interacción electromagnética. Además es un dispositivo que no tiene partes móviles, el cual transfiere la energía eléctrica de un circuito a otro bajo el principio de inducción electromagnética. La transferencia de energía la hace por lo general con cambios en los valores de voltajes y corrientes.

Casi todos los sistemas importantes de generación y distribución de potencia del mundo son, hoy en día, sistemas de corriente alterna trifásicos. Puesto que los sistemas trifásicos desempeñan un papel tan importante en la vida moderna, es necesario entender la forma como los transformadores se utilizan en ella. Considerables ventajas son las que ganan con el uso de un solo transformador trifásico en lugar de tres unidades monofásicas de la misma capacidad total. Las ventajas son rendimiento incrementado, tamaño reducido, peso reducido y menor costo.

II. OBJETIVOS

Este tema tiene por objeto estudiar:

- Cada una de las características de un transformador trifásico.
- Las diferentes conexiones de los transformadores trifásicos.
- Los diferentes tipos refrigeración de los transformadores trifásicos.
- La relación de transformación en cada una de las formas de conexión.

III. DESARROLLO DE CONTENIDOS

A. GRUPOS DE CONEXIÓN

Por lo que respecta a las bobinas primarias y secundarias, las podemos conectar de varias formas, teniendo cuatro posibles casos: estrella/estrella, estrella/delta, delta/estrella, delta/delta. Es decir, podemos conectar las bobinas primarias en estrella o en triángulo al igual que las bobinas secundarias. Dependiendo como lo hagamos tendremos unas características técnicas u otras. De esta forma, la relación de las tensiones de entrada y

de salida no solamente dependerá de la relación de vueltas (espiras) de las bobinas primarias y secundarias, sino que también dependerá de cómo estén conectadas las bobinas primarias y las bobinas secundarias.

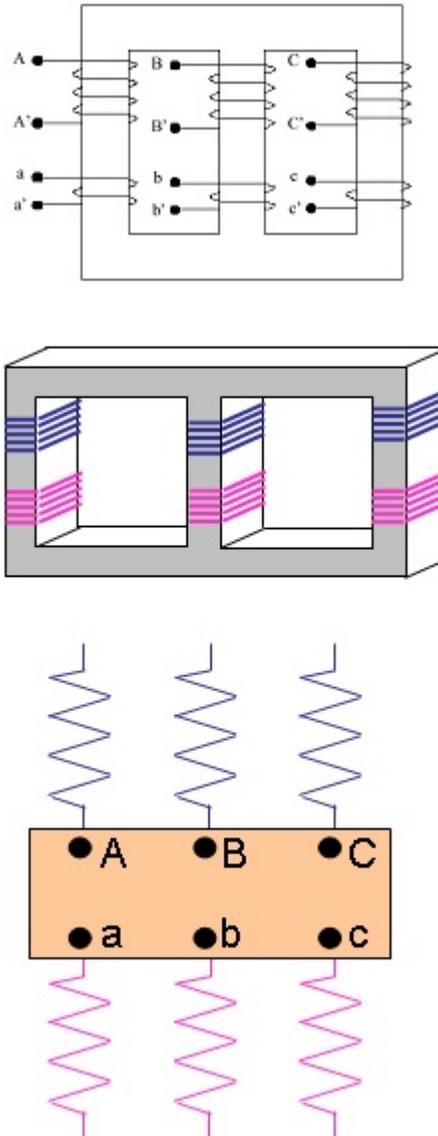


Figure 1. Conexión de un transformador trifásico

1) *La conexión estrella/estrella (Y/Y):* Con este tipo de conexión se tienen dos neutros, uno en las bobinas primarias y otro en las bobinas secundarias. El problema surge cuando no se conectan estos neutros a la masa o tierra, porque las señales u ondas senoidales salen por el secundario distorsionadas.

Solamente no es necesario conectar los neutros a tierra cuando el sistema trifásico esta muy equilibrado. Asimismo, debemos indicar que no hay un desplazamiento de fase entre las tensiones de entrada y las tensiones de salida.

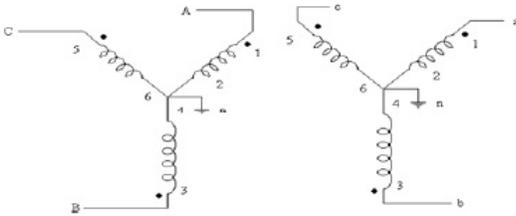


Figure 2. Conexión estrella/estrella (Y/Y)

2) *La conexión estrella/triángulo (Y - Δ)*: Con este tipo de conexión la corriente en el devanado de las bobinas secundarias es de un 58% de la corriente carga. La distorsiones de las tensiones de salida no resultan tan severos como en una conexión Y/Y. También tenemos que señalar que existe un desplazamiento de fase entre las tensiones de entrada y de salida de 30°. Este tipo de conexión se puede utilizar en aplicaciones de reducción.

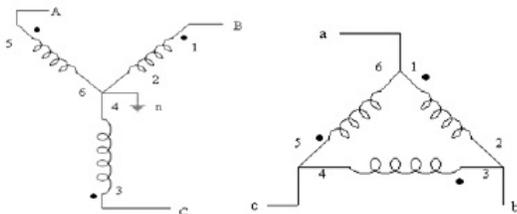


Figure 3. Conexión estrella/triángulo (Y-Δ)

3) *La conexión triángulo/triángulo (Δ - Δ)*: Este tipo de conexión tiene la desventaja de no disponer de ningún neutro, ni en el primario ni en el secundario. Otra desventaja es el aislamiento eléctrico que resulta más caro que otro de conexión (Y), para las mismas especificaciones técnicas. En este tipo de conexión las tensiones de entrada y salida se encuentran en fase. Este sistema de conexión es utilizado en sistemas trifásicos donde la tensión no es muy elevada. La principal ventaja de este modo de conexión es que aunque las cargas no estén bien equilibradas las tensiones mantienen un buen equilibrio. En el siguiente dibujo se puede apreciar como se realizan las conexiones entre los tres transformadores monofásicos:

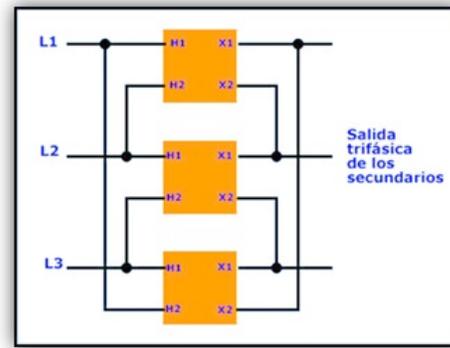


Figure 4. Conexión triángulo/triángulo

4) *La conexión triángulo/estrella (Δ - Y)*: Con una conexión de este tipo se consigue un adelanto de fase de 30° de las tensiones de salida respecto a las tensiones de entrada. La principal ventaja de este tipo de conexión es que se reduce considerablemente el gasto económico en el aislamiento interno del transformador. Sin embargo, la desventaja del desfase de 30° puede ser negativa, pues la conexión en paralelo con otra fuente de energía es imposible, por otro lado, en el caso de que este banco de transformadores tenga que alimentar a un grupo de cargas aisladas no representaría ningún inconveniente el desfase. Asimismo, podemos apreciar en el dibujo que el secundario tiene un neutro. Este tipo de conexión se utiliza en aplicaciones de elevación de tensiones.

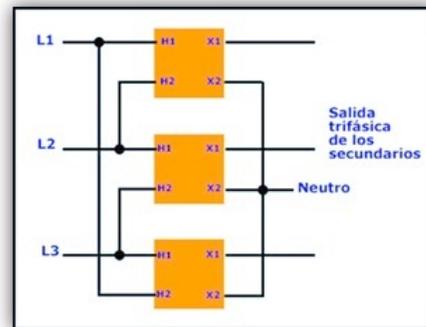


Figure 5. Conexión triángulo/estrella

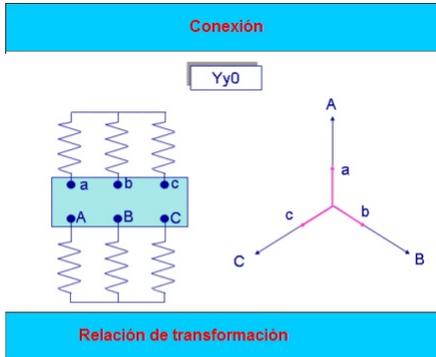
Los tres arrollamientos, tanto del primario como del secundario, se pueden conectar de diversas formas, siendo las siguientes algunas de las más frecuentes

5) *Índice Horario*: Dependiendo del tipo de conexión, las tensiones simples del primario y del secundario pueden no estar en fase, cosa que siempre ocurre en los transformadores monofásicos. Para indicar el desfase existente entre las tensiones simples, se suele utilizar el llamado índice horario (ángulo formado por la aguja grande y la pequeña de un reloj cuando marca una hora exacta), expresado en múltiplos de 30° (ángulo entre dos horas consecutivas, $360^\circ/12=30^\circ$).

El conocimiento del desfase (índice horario) es muy importante cuando se han de conectar transformadores en paralelo, dado que entonces, todos los transformadores deben tener el mismo índice horario, para evitar que puedan producirse

corrientes de circulación entre los transformadores cuando se realice la conexión.

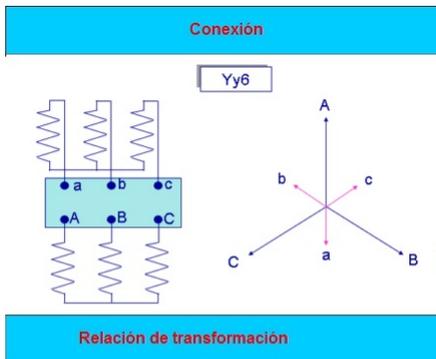
A continuación veremos algunas de las formas más frecuentes de conexión (el desfase se obtiene multiplicando el numero que acompaña la denominación por 30, ejemplo: en Yy6 el desfase es $6 * 30 = 180^\circ$)



V_{FP} = Tensión fase primario; V_{LP} = Tensión línea primario
 V_{FS} = tensión fase secundario; V_{LS} = tensión línea secundario

$$V_{FP} / V_{FS} = m$$

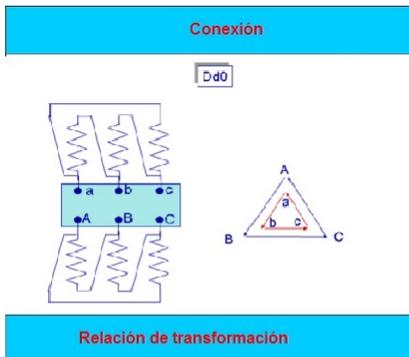
$$V_{LP} / V_{LS} = (\sqrt{3} * V_{FP}) / (\sqrt{3} * V_{FS}) = m$$



V_{FP} = Tensión fase primario; V_{LP} = Tensión línea primario
 V_{FS} = tensión fase secundario; V_{LS} = tensión línea secundario

$$V_{FP} / V_{FS} = m$$

$$V_{LP} / V_{LS} = (\sqrt{3} * V_{FP}) / (\sqrt{3} * V_{FS}) = m$$

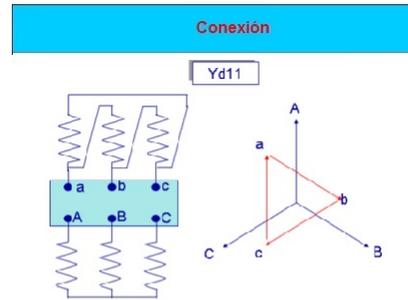


V_{FP} = Tensión fase primario; V_{LP} = Tensión línea primario
 V_{FS} = tensión fase secundario; V_{LS} = tensión línea secundario

$$V_{FP} / V_{FS} = m \quad V_{LP} = V_{FP}$$

$$V_{LS} = V_{FS}$$

$$V_{LP} / V_{LS} = V_{FP} / V_{FS} = m$$

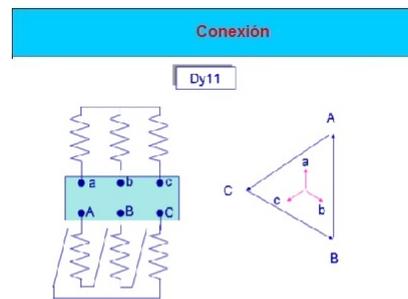


Relación de transformación

V_{FP} = Tensión fase primario; V_{LP} = Tensión línea primario
 V_{FS} = tensión fase secundario; V_{LS} = tensión línea secundario
 $V_{FP} / V_{FS} = m$

$$V_{LP} / V_{LS} = (\sqrt{3} * V_{FP}) / V_{FS}$$

$$V_{LP} / V_{LS} = (\sqrt{3} * m)$$

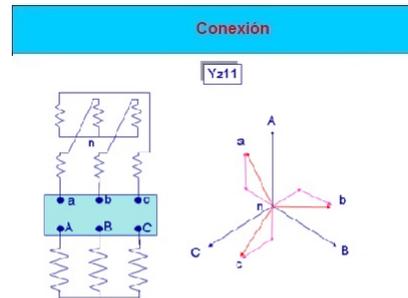


Relación de transformación

V_{FP} = Tensión fase primario; V_{LP} = Tensión línea primario
 V_{FS} = tensión fase secundario; V_{LS} = tensión línea secundario
 $V_{FP} / V_{FS} = m$

$$V_{LP} / V_{LS} = V_{FP} / (\sqrt{3} * V_{FS})$$

$$V_{LP} / V_{LS} = m / \sqrt{3}$$



Relación de transformación

V_{FP} = Tensión fase primario; V_{LP} = Tensión línea primario
 V_{FS} = tensión fase secundario; V_{LS} = tensión línea secundario

$$V_{FP} / V_{FS} = m$$

$$V_{LP} / V_{LS} = \sqrt{3} V_{FP} / (\sqrt{3} \sqrt{3} V_{FS} / 2)$$

$$V_{LP} / V_{LS} = 2 m / \sqrt{3}$$

B. TIPOS DE NÚCLEOS TRIFÁSICOS

Existen especialmente dos formas de núcleo que se utilizan en los transformadores trifásicos cuando utilizamos un único núcleo.

1) *Transformador trifásico tipo núcleo*: El tipo núcleo tiene tres columnas ubicadas paralelamente, unidas en sus

partes inferior y superior por medio de láminas de metales dispuestos de forma horizontal. Cada columna posee el devanado primario y secundario de la fase que le corresponde. Se encuentra un desequilibrio debido a que cada una de las fases tiene corrientes magnetizantes distintas, estas corrientes magnetizantes distintas son debidas a que el ancho de las columnas del transformador no son iguales, por lo menos la columna del centro es mas delgada que las columnas laterales.

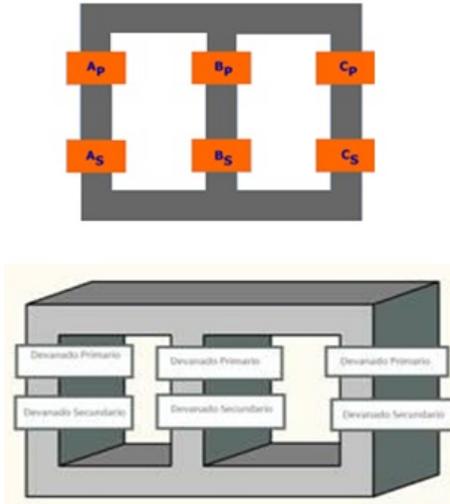


Figure 6. Transformador trifásico tipo núcleo

2) *Transformador con núcleo tipo acorazado*: Este tipo de núcleo, a comparación con el núcleo tipo columna tiene la ventaja con respecto al llamado tipo columna, de reducir la dispersión magnética, su uso es más común en los transformadores monofásicos. En el núcleo acorazado, los devanados se localizan sobre la columna central. Dado que las tensiones en el transformador tipo acorazado presentan menos distorsiones en las salidas de las fases este transformador es mejor que el transformador tipo núcleo.

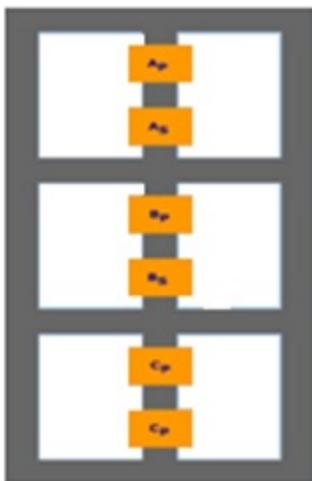


Figure 7. Transformador trifásico con núcleo tipo acorazado

La diferencia entre estos es que en el de tipo acorazado las tensiones están menos distorsionadas en las salidas de las

fases. Lo cual hace mejor este tipo de transformador

C. FORMA DE LOS DEVANADOS

Estas formas dependen mucho del nivel de voltaje al cual van a trabajar los transformadores, clasificándose en alta tensión y baja tensión, la razón principal por la que se clasifica a los devanados de esta manera es por que los criterios que se toman en cuenta al momento del diseño de los devanados en baja tensión son diferentes a los usados en el diseño de los devanados de alta tensión.

1) *Devanados en baja tensión*: Generalmente los devanados que trabajan en baja tensión están constituidos de dos o tres capas sobrepuestas de espiras, estas espiras están aisladas entre si por papel o mas generalmente se usan cables esmaltados. Al usar cables esmaltados es muy importante tomar en consideración el desgaste de los mismos, ya que si se llega a raspar el esmalte, habría continuidad entre las capas, provocando así una falla en el transformador.

2) *Devanados en alta tensión*: Los transformadores de alta tensión son usados principalmente en líneas de distribución en el cual ingresa 22000V al primario y se obtiene 220V al secundario, se aquí en donde se aplica la gran diferencia de los devanados en alta y baja tensión, la diferencia de potencial en este caso es muy elevado, por la cual tiene otro tratamiento y los criterios de diseño son diferentes a los usados en los transformadores de baja tensión. Los devanados de alta tensión, tienen muchas más espiras que los devanados de baja tensión. Estos devanados se pueden encontrar comúnmente constituidos de dos maneras

- La primera se conoce como tipo bobina y está formado de varias capas de cable, estas bobinas tienen forma discoidal y se conectan en serie para obtener el total de espiras de una fase.
- La segunda forma de construcción es la de capas, que es una sola bobina con varias capas, la longitud de esta bobina es equivalente a las varias bobinas discoidales necesarias para conformar el devanado equivalente, por lo general, el número de espiras por capa en este tipo de devanado; es superior al constituido de varias bobinas discoidales.

D. DISPOSICIÓN DE LOS DEVANADOS.

En el transformador los devanados deben estar colocados de manera que se encuentren bien aislados y que eviten en todo lo posible la dispersión del flujo. Esto se logra de mejor manera cuando existe una buena separación entre las espiras de la bobina y colocando al primario lo más cerca posible del secundario. Para alcanzar estos requerimientos tenemos estos tres tipos de disposición de devanados:

1) *Devanado Concéntrico simple*: El devanado concéntrico simple, donde cada uno de los devanados está distribuido a lo largo de toda la columna del núcleo, el devanado de tensión más baja se encuentra en la parte interna, más cerca del núcleo y aislado de este, mientras que el de tensión más elevada, sobrepuesto a este pero debidamente aislados.

2) *Devanado tipo alternado*: En el devanado tipo alternado, los dos devanados están subdivididos cada uno en cierto número de bobinas que están dispuestas en las columnas en forma alternada.

3) *Devanado Concéntrico doble*: El devanado concéntrico doble, se consigue cuando el devanado de menor tensión se divide en dos mitades dispuestas respectivamente al interior y al exterior uno de otro. Esta configuración de devanado tiene la ventaja de que el valor de la reactancia de dispersión es la mitad del valor de la reactancia de dispersión que produce el concéntrico simple, mientras que el tipo alternado, en cambio, permite variar tales reactancias, repartiendo en forma distinta las posiciones de las bobinas de los dos devanados.

Para los esfuerzos mecánicos son mejor las disposiciones de tipo alternado, pues permite que el transformador soporte mejor los esfuerzos mecánicos. Las consideraciones que se deben tomar en cuenta desde el punto de vista de diseño, para la disposición de los devanados, son aquellos referentes al enfriamiento, el aislamiento, la reactancia de dispersión y a los esfuerzos mecánicos.

E. LOS ACEITES DIELECTRICOS

Los aceites dieléctricos se obtienen a partir de bases nafténicas de bajo punto de fluidez, libres de ceras y sometidas a proceso de refinación de extracción por solventes y de tratamiento con hidrógeno.

1) *Propiedades de los aceites dieléctricos*:

- Buenas propiedades como aislante, las cuales dependen en su totalidad de la ausencia de impurezas, tales como suciedad, materias extrañas y agua pues aun en pequeñas cantidades pueden disminuir operacionalmente la rigidez dieléctrica.
- Los aceites dieléctricos son cuidadosamente secados y filtrados, en el momento de su envasado.
- Los aceites dieléctricos poseen una alta resistencia a la oxidación, lo que permite funcionar por largos períodos, tanto en transformadores de potencia y de distribución como en interruptores. Poseen alta estabilidad química y buenas propiedades refrigerantes debido a su baja viscosidad, lo cual le facilita la transferencia del calor generado en el transformador.

2) *Aplicaciones de los aceites dieléctricos*:

- Transformadores de potencia y de distribución.
- Interruptores de Potencia en baños de aceite.
- Condensadores.
- Como medio aislante en las bobinas de arranque de automóviles.
- Como aceite dieléctrico en general.

3) *Degeneración del aceite aislante*: El Aceite Aislante va degenerándose dentro del Transformador Eléctrico durante el funcionamiento normal del mismo. La degeneración dependerá de muchos factores, como el tipo de transformador, ubicación, carga y temperatura de trabajo, etc. La Contaminación de los Aceites Aislantes está básicamente relacionada con:

- Presencia de humedad en el Aceite (agua): medida en PPM (partes por millón). El valor max, según la norma IEC 296 para transformadores, no debe superar 30 PPM,

aunque algunos fabricantes pueden recomendar máximos de 10 PPM de agua, para transformadores eléctricos de Alta Tensión >170 KV

- *Partículas*: la fabricación de los transformadores implica la utilización de papales y celulosa, que pueden desprender pequeñas partes por vibración, etc. Además, los transformadores necesitan un respirador para poder compensar las dilataciones del aceite, siendo foco de entrada de polvo, etc al interior del transformador, y por lo tanto al aceite.
- *Oxidación*: Esfuerzos de trabajo, puntos calientes, degeneración de las partículas y suciedad y descompensaciones provocan la generación de gases disueltos y oxidación del Aceite Aislante del transformador.

4) *Comprobación aceites aislantes*: La toma de muestras para el análisis del Aceite Aislante desde ser realizada de forma segura y cuidadosa, para conseguir resultados reales. Las pruebas básicas que pueden hacerse a los Aceites Aislantes para transformador son:

- *Test de Rigidez Dieléctrica*: Consiste en la comprobación de la capacidad aislante del aceite del transformador, mediante la extracción de una muestra y el uso de un aparato Comprobador de Rigidez Dieléctrica (conocido vulgarmente como CHISPOMETRO).
- *Agua disuelta en el Aceite*: Medida en PPM, partes por Millón, y de efecto directo en la pérdida de la Rigidez Dieléctrica de la muestra.
- *Neutralización/Acidez*: Control de los niveles de ACIDO en el Aceite, como referencia del nivel de Oxidación del mismo.
- *Turbiedad/Color*: Tanto la presencia de Agua como de otras partículas disueltas produce turbiedad en el Aceite Aislante.
- *Partículas Disueltas*: contaminación por todo tipo de suciedad.
- *Gases Disueltos*: El envejecimiento, junto con la degradación de las partículas por la temperatura y posibles descargas internas, generan diferentes gases dentro del transformador y en el aceite. El tipo y cantidad de ellos pueden dar importante información.
- *Tensión Superficial*: Valor Físico del Aceite, con relación con la viscosidad.

5) *Mantenimiento del aceite aislante*: Consejos para aumentar la duración de los Aceites Aislantes en los Transformadores Aunque en algunas ocasiones donde la degradación y contaminación del Aceite haga más cara su regeneración que su sustitución, vamos a dar una serie de consejos que eviten llegar a esa situación:

- Equilibrar adecuadamente los Transformadores lograr que el aceite cubra la totalidad de las partes del interior de los mismos.
- Colocar filtros adecuados en los respiradores de los Transformadores, de forma que evite la entrada de la mayor cantidad posible de humedad, polvo y otras partículas.
- Comprobar el cierre de tapas, pasacables, mirilla, etc. Para evitar tanto el acceso de suciedad como la pérdida de aceite.

- Realizar pruebas, test y/o análisis periódicos para poder tomar acciones de mantenimiento antes de que, la excesiva degradación del aceite lo haga irrecuperable e incluso daño de forma grave el interior del Transformador.
- El uso de Equipos de Purificación y Regeneración de Aceite Aislante permite devolver las características funcionales mínimas para continuar usándolo. Este tratamiento debe realizarse antes de que la contaminación del Aceite provoque depósitos en el fondo del Transformador.

F. BANCO DE TRANSFORMADORES

Los bancos de transformadores monofásicos son utilizados en sistemas eléctricos trifásicos como sustitución de un transformador trifásico. Por ejemplo, en el transporte a largas distancias de la energía eléctrica. Asimismo, el banco de transformadores monofásicos también sirve para poder cambiar el número de fases del sistema, es decir, un sistema trifásico lo podemos convertir en un sistema bifásico, de 6 fases, de doce fases, etc.

G. REFRIGERACIÓN DE LOS TRANSFORMADORES TRIFÁSICOS

Es habitual dotar al transformador de sistemas de refrigeración basados en bombas de aceite y ventiladores de aire, pero manteniendo una determinada capacidad de transformación cuando falla alguno de ellos. Si el calor que se produce en los transformadores no se evacua convenientemente se puede producir la destrucción de los materiales aislantes de los devanados. Para evacuar este calor se emplean diferentes métodos de refrigeración en función de la potencia nominal del transformador y la ubicación del mismo.

- Para transformadores de pequeña potencia (hasta 50 KVA): La refrigeración se realiza aprovechando el aire que envuelve a los mismos. Si no hay ventilación suficiente, se añadirán ventiladores.
- Para transformadores de pequeña potencia (menos de 200KVA): Se sumergen en aceite mineral o silicona. El aceite transmite el calor de transformador al exterior por convección natural.
- Para transformadores de gran potencia: Se añaden aletas de refrigeración en la cubierta exterior del mismo.

1) *Refrigeración tipo ONAN (Oil Natural circulation Air Natural circulation)* : Este tipo de refrigeración se basa en la circulación natural del aceite y del aire en los radiadores.



Figure 8. Transformador con refrigeración tipo ONAN

2) *Refrigeración tipo ONAF (Oil Natural circulation Air Forced circulation)*: Esta tipo de refrigeración se da mediante la circulación natural del aceite y circulación forzada de aire a través los radiadores.



Figure 9. Transformador con refrigeración tipo ONAF

3) *Refrigeración tipo OFAF (Oil Forced circulation Air Forced circulation)*: Esta tipo de refrigeración se da mediante la circulación forzada del aceite (bombas de aceite hacia los radiadores) y circulación forzada de aire a través los radiadores.



Figure 10. Transformador con refrigeración tipo OFAF

4) *Refrigeración tipo ODAF (Oil forced circulation Directed Air Forced)*: Esta tipo de refrigeración se basa en la

circulación forzada y dirigida del aceite (bombas de aceite hacia los radiadores y elementos de direccionamiento en el interior del transformador hacia los canales del aceite) y circulación forzada de aire a través los radiadores.



Figure 11. Transformador con refrigeración tipo ODAF

H. CONEXIÓN ZIG-ZAG (Z)

Para relacionar las tensiones y las corrientes primarias con las secundarias, no basta en los sistemas trifásicos con la relación de transformación, sino que se debe indicar los desfases relativos entre las tensiones de una misma fase entre el lado de Alta Tensión y el de Baja Tensión. Una manera de establecer estos desfases consiste en construir los diagramas fasoriales de tensiones y corrientes, conociendo: la conexión en baja y alta tensión (estrella, triángulo o zig-zag), las polaridades de los enrollados en un mismo circuito magnético o fase, y las designaciones de los bornes.

Conexiones en Zig-zag (Z)

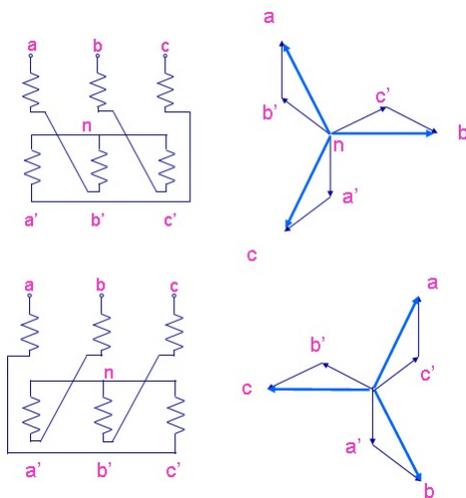


Figure 12. Conexión zig - zag de un transformador trifásico

I. CONEXIONES TRIFÁSICAS ESPECIALES

Además de las conexiones usuales de los transformadores trifásicos, existen otras formas para transformar corriente trifásica con solo dos transformadores. Todas las técnicas usadas para esto se basa reducción de la capacidad de carga de los transformadores, que puede justificarse por ciertos factores económicos. Algunas de las principales conexiones de este tipo son:

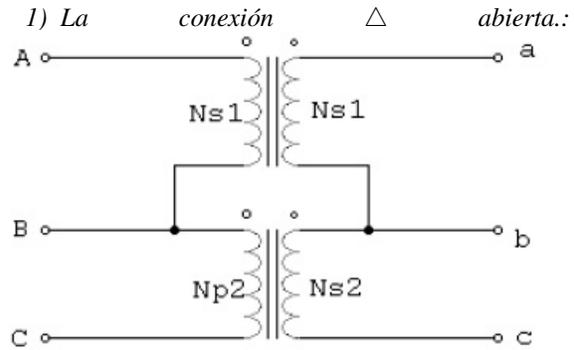


Figure 13. Conexión delta abierta.

En ciertas situaciones no puede utilizarse un banco de transformadores completo para realizar una transformación trifásica. Por ejemplo, supóngase que un banco de transformadores $\Delta - \Delta$ que consta de transformadores separados tiene una fase dañada que se debe retirar para su reparación. Siendo los voltajes secundarios que permanecen $V_A = V \angle 0^\circ$ y V , entonces el voltaje que pasa a través la abertura que dejó el tercer transformador está dado por

$$V_C = -V_A - V_B$$

$$V_C = -V \angle 0^\circ - V \angle 120^\circ$$

$$V_C = -V - (0.5V - j0.866V)$$

$$V_C = -0.5V + j0.866V$$

$$V_C = V \angle 120^\circ$$

Éste es el mismo voltaje que estaría presente si el tercer transformador siguiera ahí. A menudo, a la fase C se le llama fase fantasma. Entonces, la conexión delta abierta posibilita que un banco de transformadores siga funcionando con sólo dos de sus transformadores. Permitiendo que fluya cierta potencia aun cuando se haya removido una fase dañada.

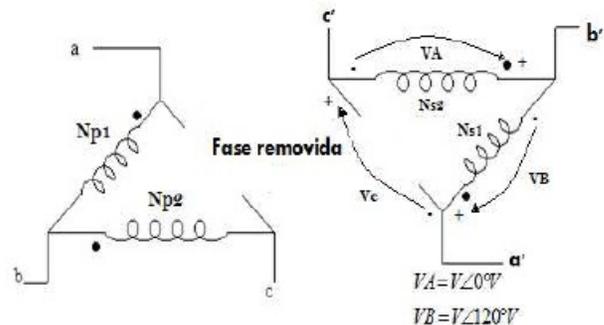


Figure 14. Demostración de la Fase dañada.

Si el voltaje nominal de un transformador en el banco es V_Φ y la corriente nominal es I_Φ entonces la potencia máxima que puede suministrar a la carga es:

$$P = 3V_\Phi I_\Phi \cos\theta$$

El ángulo entre el voltaje V , Y la corriente I , en cada fase es 0° , por lo que la potencia total suministrada por el transformador es:

$$P = 3V_\phi I_\phi \cos\theta$$

$$P = 3V_\phi I_\phi$$

En la siguiente figura se muestra un transformador con delta abierta. Debido a que falta una de las fases del transformador, la corriente de línea de transmisión es igual a la corriente de fase en cada transformador y las corrientes y voltajes en el banco del transformador tienen un ángulo que difiere por 30° .

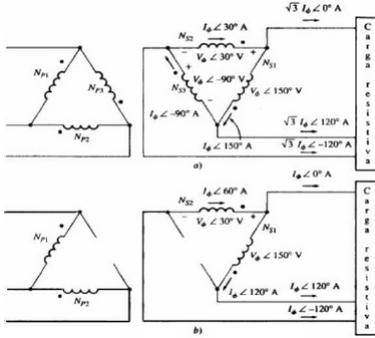


Figure 15. Transformador con delta abierta

La figura anterior contiene:

- Voltajes y corrientes en un banco de transformador $\Delta - \Delta$.
- Voltajes y corrientes en un banco de Transformador Δ abierta. Para el transformador 1 el voltaje tiene un ángulo de 150° y la corriente tiene un ángulo de 120° , por lo que la expresión para la potencia máxima en el transformador es:

$$P = 3V_\phi I_\phi \cos(150 - 120)$$

$$P = 3V_\phi I_\phi \cos 30$$

$$P = \frac{\sqrt{3}}{2} V_\phi I_\phi$$

Para el transformador 2, el voltaje tiene un ángulo de 30° y la corriente tiene un ángulo de 60° , por lo que la potencia máxima es:

$$P_2 = 3V_\phi I_\phi \cos(30 - 60)$$

$$P_2 = 3V_\phi I_\phi \cos(-30)$$

$$P_2 = \frac{\sqrt{3}}{2} V_\phi I_\phi$$

Por lo tanto, la potencia máxima total para el banco delta abierta está dada por:

$$P_2 = \frac{\sqrt{3}}{2} V_\phi I_\phi$$

La corriente nominal es la misma en cada transformador, sin importar si son dos o tres, y el voltaje es el mismo en cada transformador; por lo que la razón entre la potencia de salida disponible del banco delta abierta y la potencia disponible del banco trifásico normal es:

$$\frac{P_{abierta\Delta}}{P_{3\text{ fase}}} = \frac{\sqrt{3}V_\phi I_\phi}{3V_\phi I_\phi} = \frac{1}{\sqrt{3}} = 0.577$$

La potencia disponible que sale del banco delta abierta es sólo 50.7% del valor nominal del banco original. ¿Qué pasa con el resto del valor nominal del banco delta abierta? Después de todo, la potencia total que los dos generadores juntos pueden producir equivale a dos tercios del valor nominal del banco original. Para encontrar la respuesta se debe examinar la potencia reactiva del banco delta abierta. La potencia reactiva del transformador 1 es:

$$Q_1 = 3V_\phi I_\phi \sin(150 - 120)$$

$$Q_1 = 3V_\phi I_\phi \cos(30)$$

$$Q_2 = \frac{1}{2} V_\phi I_\phi$$

La potencia reactiva del transformador es:

$$Q_2 = 3V_\phi I_\phi \sin(30 - 60)$$

$$Q_2 = 3V_\phi I_\phi \cos(-30)$$

$$Q_2 = -\frac{1}{2} V_\phi I_\phi$$

Entonces, un transformador produce potencia reactiva que consume el otro. Este intercambio de energía entre los dos transformadores es lo que limita la potencia de salida a 57.7% del valor nominal del banco original en lugar del esperado 66.7%. Otra manera de ver el valor nominal de la conexión delta abierta es que se puede utilizar 86.6% del valor nominal de los dos transformadores restantes. Las conexiones delta abierta se utilizan ocasionalmente cuando se desea suministrar una pequeña cantidad de potencia trifásica a una carga monofásica. En tal caso, se puede utilizar la conexión de esta figura, donde el transformador T2 es mucho más grande que el transformador T1.

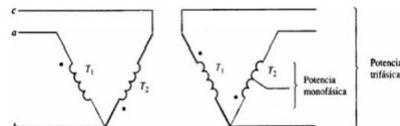


Figure 16. Demostración de potencias.

La utilización de una conexión de transformador en delta suministrar una pequeña cantidad de potencia trifásica y mucha potencia monofásica.

2) *La conexión Scott-T*: La conexión Scott-T es la manera de obtener dos fases, separadas 90° eléctricos en el espacio y en el tiempo, a partir de una fuente de alimentación trifásica, cuyas fases se hallan separadas 120° eléctricos en el espacio y en el tiempo.

En los comienzos de la transmisión de CA, los sistemas de potencia bifásicos y trifásicos eran bastantes comunes. Por aquellos días, era una necesidad rutinaria la interconexión de sistemas de dos y tres fase, y la conexión Scott-T de transformadores se desarrolló para lograr dicho propósito.

También es posible convertir fuente bifásica en una fuente trifásica por medio de esta conexión; sin embargo, al existir muy pocos generadores bifásicos en uso, es rara su aplicación.

Esta conexión consiste en dos transformadores monofásicos con idéntica potencia nominal. Uno tiene derivación en su bobinado primario al 86.7% de voltaje a plena carga. Están conectados tal como se ilustra en la figura. La derivación del transformador T1 al 86.6%, está conectada a la derivación central del transformador T2. Las tensiones aplicadas al bobinado primario aparecen en la figura inferior y las tensiones resultantes, aplicadas a los primarios de los transformadores, se ilustran en dicha figura. Como estas tensiones están separadas 90° , producirán una salida bifásica.

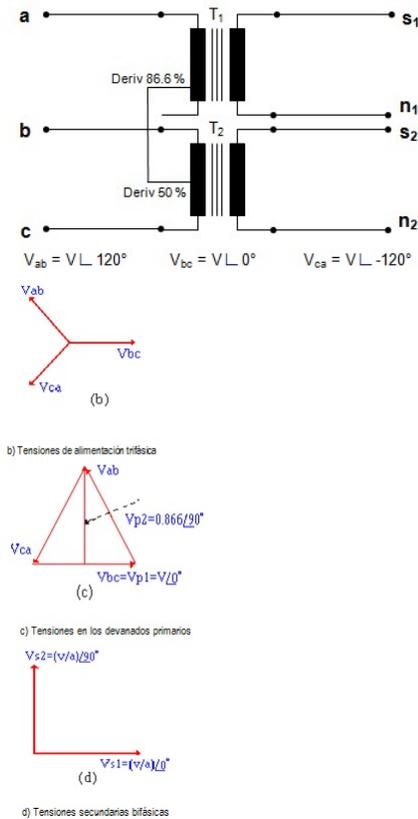


Figure 17. Conexión Scott-T

IV. CONCLUSIONES

En conclusión se puede acotar que el documento presentado nos ayudara de buena manera a conocer el tema de los

transformadores trifásicos y la aplicación que puede tener dentro de los diferentes campos tanto de la industria como en distribución de energía, gracias a cada una de sus características que se presentaron y se analizaron con la debida profundidad. Recalcando el hecho de que para la elección de un transformador en general se debe tener muy en cuenta el uso que se le va a dar, es decir el campo de acción donde prestara sus servicios de manera funcional y permanente.

Además hay considerables ventajas son las que se ganan con el uso de un solo transformador trifasico en lugar de tres unidades monofasicas de la misma capacidad total. Las ventajas son rendimiento incrementado, tamaño reducido, peso reducido y menor costo. Una reducción del espacio es una ventaja desde el punto de vista estructural en estaciones generadoras o bien subestaciones.

REFERENCES

[A. E. FITZGERALD, CHARLES KINGSLEY, JR. STEPHEN D, UMANS. MÁQUINAS

[<http://www.dimie.uniovi.es/instalaciones/ensayosinstalaciones.html>]

[MAQUINAS ELECTRICAS, Tercera Edición, STEPHEN J. CHAPMAN]