

EL TRANSFORMADOR

La invención del transformador, data del año de 1884 para ser aplicado en los sistemas de transmisión que en esa época eran de corriente directa y presentaban limitaciones técnicas y económicas. El primer sistema comercial de corriente alterna con fines de distribución de la energía eléctrica que usaba transformadores, se puso en operación en los Estados Unidos de América. En el año de 1886 en Great Barington, Mass., en ese mismo año, al protección eléctrica se transmitió a 2000 volts en corriente alterna a una distancia de 30 kilómetros, en una línea construida en Cerchi, Italia. A partir de estas pequeñas aplicaciones iniciales, la industria eléctrica en el mundo, ha recorrido en tal forma, que en la actualidad es factor de desarrollo de los pueblos, formando parte importante en esta industria el transformador.

El transformador, es un dispositivo que no tiene partes móviles, el cual transfiere la energía eléctrica de un circuito u 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.

Un transformador elevador recibe la potencia eléctrica a un valor de voltaje y la entrega a un valor más elevado, en tanto que un transformador reductor recibe la potencia a un valor alto de voltaje y a la entrega a un valor bajo.

Principios de inducción electromagnética.

La electricidad magnetismo en un electroimán, que es distinto de un imán permanente, y que el Campo magnético se produce sólo cuando las espiras de alambre arrolladas alrededor del núcleo magnético, transportan corriente eléctrica. Para determinar la polaridad de un electroimán se puede usar la llamada regla de la mano izquierda.

Principio de funcionamiento del transformador.

El principio de funcionamiento del transformador, se puede explicar por medio del llamado transformador ideal monofásico, es decir, una máquina que se alimenta por medio de una corriente alterna monofásica.

A reserva de estudios con mayor detalle, la construcción del transformador, sustancialmente se puede decir que un transformador está constituido por un núcleo de material magnético que forma un circuito magnético cerrado, y sobre de cuyas columnas o piernas se localizando devanados, uno denominado "primario" que recibe la energía y el otro el secundario, que se cierra sobre un circuito de utilización al cual entrega la energía. Los dos devanados se encuentran eléctricamente aislado entre sí.

El voltaje en un generador eléctrico se induce, ya sea cuando una bobina se mueve a través de un campo magnético o bien cuando el campo producido en los polos en movimiento cortan una bobina estacionaria. En ambos casos, el flujo total es sustancialmente contante, pero hay un cambio en la cantidad de flujo que eslabona a la bobina. Este mismo principio es válido para el transformador, solo que en este caso las bobinas y el circuito magnético son estacionarios (no tienen movimiento), en tanto que el flujo magnético cambio continuamente.

El cambio en el flujo se puede obtener aplicando una corriente alterna en al bobina. La corriente, a través de la bobina, varía en magnitud con el tiempo, y por lo tanto, el flujo producido por esta corriente, varia también en magnitud con el tiempo.

El flujo cambiante con el tiempo que se aplica en uno de los devanados, induce un voltaje E_1 (en el primario). Si se desprecia por facilidad, la caída de voltaje por resistencia de el devanado primario, el valor de E_1 será igual y de sentido opuesto al voltaje aplicado V_1 . De la ley de inducción electromagnética, se sabe que este voltaje inducido E_1 en el devanado primario y también al índice de cambio del flujo en la bobina. Se tienen dos relaciones importantes.

$$\begin{array}{rcll} V_1 & = & - & E_1 \\ E_1 & \alpha & N_1 & (0/T) \end{array}$$

La mismo tiempo que el flujo cambia en la bobina primaria, también cambia en la bobina secundaria, dado que ambas bobinas se encuentran dentro del mismo medio magnético, y entonces el índice de cambio del flujo magnético en ambas bobinas es exactamente el mismo. Este cambio en el flujo inducirá un flujo E_2 en la bobina secundaria que será proporcional al número de espiras en el devanado secundario N_2 . Si se considera que no se tiene carga conectada al circuito secundario, el voltaje inducido E_2 es el voltaje que aparece en las terminales del secundario, por lo que se tienen dos relaciones adicionales.

$$\frac{E_2}{E_1} = \frac{N_2}{N_1} \quad (0/T)$$

En virtud de que ambas bobinas se encuentran devanadas en el mismo circuito magnético, los factores de proporcionalidad para las ecuaciones de voltaje son iguales, de manera que si se dividen las ecuaciones para E_1 y E_2 se tiene:

$$\frac{E_1}{E_2} = \frac{N_1}{N_2}$$

Además como numéricamente deben ser iguales E_1 y V_1 o V_2 - A ecuación anterior se puede escribir como:

$$\frac{V_1}{V_2} = \frac{N_1}{N_2}$$

Relación de corriente.

Si se conecta una carga al secundario del transformador, el voltaje inducido E_2 hace que circule una corriente I_2 en el devanado secundario.

Debido a la circulación de corrientes, se tiene en el devanado secundario una fuerza magnetomotriz (FMM) $N_2 I_2$ opuesta a la del primario $N_1 I_1$. Es conveniente recordar que el voltaje inducido en el primario E_1 es siempre directamente proporcional al flujo Φ y también es igual al voltaje aplicado V_1 , considerando como antes, todos estos valores como eficaces. Dado que el voltaje aplicado no cambia, el flujo en el núcleo debe ser constante, cualquier incremento en la corriente secundaria, será balanceado por un incremento en la corriente primaria, de manera que el flujo de energización producido por la corriente en el primario tendrá un valor efectivo constante durante la operación del transformador. En los transformadores de potencia de valor relativamente pequeño, se puede decir que prácticamente el flujo que eslabona al devanado primario, es el mismo que eslabona al secundario y de aquí que la corriente de vacío o de energización representa sólo el 2% o 3% de la corriente primaria de plena carga ya se puede decir que los ampere-espira del primario son iguales a los ampere-espira del secundario, es decir:

$$\begin{aligned} N_1 I_1 &= N_2 I_2 \\ I_1 &= \frac{N_2}{N_1} I_2 \\ I_2 &= \frac{N_1}{N_2} I_1 \end{aligned}$$

La aplicación de los circuitos equivalentes.

Cuando los transformadores se usan dentro de una red compleja para estudiar el comportamiento por lo que se refiere a la distribución de la carga, las caídas de tensión, el corto circuito, etc. conviene, con relación a lo ahora expuesto sobre el funcionamiento del transformador, considerando con lo que se conoce como "El circuito equivalente" que en su forma más completa está constituido por un transformador "ideal" (de relación N_1/N_2) conectado a las resistencias R_0 , R_1 y R_2 y a las reactancias X_0 , X_1 y X_2 .

Diagrama equivalente de un transformador monofásico.

La resistencia R_0 representa el efecto disipativo, debido a las pérdidas en vacío, R_1 es la resistencia del devanado primario, R_2 la del secundario.

En forma análoga X_0 representa el efecto de absorción de la corriente de magnetización, en tanto que X_1 y X_2 representan los efectos de los flujos dispersos en los devanados primario y secundario.

Para algunos estudios, no se requiere considerar los efectos de la saturación del núcleo del transformador y son despreciables, en cambio en otros se requiere de mayor precisión y entonces a R_0 y X_0 se les atribuyen propiedades no lineales.

Como se mencionó antes, para algunos estudios es conveniente hacer referencia a los valores de tensiones y corrientes referidos a un devanado a un lado del transformador, por lo general, el primario que es el de alimentación. En estos casos el esquema equivalente se simplifica a un circuito "T".

CIRCUITO EQUIVALENTE DEL TRANSFORMADOR REFERIDO AL LADO PRIMARIO.

La resistencia y reactancia secundarias se refieren al devanado primario de acuerdo con las relaciones:

$$R_{21} = R_2 \frac{(N_1)^2}{N_2}$$
$$X_{21} = X_2 \frac{(N_1)^2}{N_2}$$

En forma análoga la resistencia y reactancia primaria se pueden referir al secundario.

Determinación las constantes del transformador.

Los valores reales de resistencia y reactancia de los devanados de un transformador, se pueden obtener de pruebas de laboratorios mediante mediciones y algunos cálculos relativamente simples y que son la base de los valores usados en los circuitos equivalente son la base de los valores usados en los circuitos equivalentes. Algunos de estos valores o parámetros del transformador obtenidos para el transformador pueden no existir físicamente, pero pueden ayudar a comprender la operación del transformador.

La prueba de corto circuito en el transformador.

La prueba de corto circuito consiste en cerrar o poner en corto circuito, es decir, con una conexión de resistencia despreciable, las terminales de uno de los devanados y alimentar el otro con un voltaje reducido (aplicado en forma regulada_ de un valor reducido de tensión que representa un pequeño porcentaje del voltaje del devanado por alimentar, de tal forma, que en los devanados circulen las corrientes nominales. En esta condiciones se miden las corrientes nominales y la potencia absorbida.

Debido a que la tensión aplicada es pequeña en comparación con la tensión nominal, las pérdidas en vacío o en el núcleo se pueden considerar como despreciables, de manera que toda la potencia absorbida es debida a las pérdidas por efecto joule en los devanados primario y secundario.

Diagrama para la prueba de cortocircuito de un transformador monofásico.

Wattmeter que indica la potencia de pérdidas por efecto de circulación de las corrientes en los devanados primario y secundario.

Conexión de corto circuito entre las terminales del devanado.

Voltaje de alimentación de valor reducido, de manera que se hagan circular las corrientes I_1 , I_2 de valor nominal en cada devanado.

El voltaje aplicado (V_c) es regulado y se varía como se indicó antes, hasta que circule la corriente de plena carga en el primario. De los valores medidos se obtiene "la impedancia total" del transformador como:

$$Z_g = \frac{V_{cc}}{I_1}$$

Donde:

- I₁ = Corriente nominal primaria.
- V_{cc} = Voltaje de corto circuito aplicado en la prueba.
- Z_t = Impedancia total interna referida a devanado primario. Esta impedancia se conoce también como impedancia equivalente del transformador.

Perdida en los devanados a plena carga.

Debido a que el flujo es directamente proporcional al voltaje, el flujo mutuo en el transformador bajo las condiciones de prueba de corto circuito es muy pequeño, de manera que las pérdidas en el núcleo son despreciables. Sin embargo, la corriente que circula a través de la resistencia de los devanados produce las mismas pérdidas en estos, que cuando opera en condiciones de plena carga, esto se debe a que en ambos devanados se hace circular la corriente nominal.

En el circuito para la prueba de corto circuito, si el wattmetor se conecta en el devanado primario o de alimentación, entonces se "miden" las pérdidas en los devanados ya que no ha otras pérdidas consideradas, de este valor que se toma de las pérdidas, se puede calcular "la resistencia equivalente" del transformador como:

$$R_T = \frac{P_{cc}}{(I_1)^2}$$

Donde:

- P_{cc} = Pérdidas en los devanados y que se obtienen de la lectura del Wattmetro.

Se deben tener siempre en mente, que el valor de la resistencia R_t, no es la suma aritmética de las resistencias en los devanados primario y secundario. Es un valor que se determina del circuito equivalente y por tal motivo se le denomina "la resistencia equivalente del transformador".

La impedancia equivalente de un transformador se puede expresar en términos de la resistencia y reactancia equivalente como:

$$Z_T = \sqrt{R_T^2 + X_T^2}$$

de tal forma, que la reactancia equivalente del transformador se calcula como:

$$X_T = \sqrt{Z_T^2 - R_T^2}$$

Estos valores están por lo general referidos al devanado de alto voltaje, debido a que se acostumbra poner en corto circuito el devanado de bajo voltaje, es decir las mediciones se hacen en el devanado de alto voltaje. Esto es por lo general el método normal de prueba. Las razones principales para esto:

1. La corriente nominal en el devanado de alto voltaje es menor que la corriente nominal en el devanado de bajo voltaje. Por lo tanto, son menos peligrosas y por otra parte es más fácil encontrar instrumentos de medición dentro del rango.
2. Debido a que el voltaje aplicado es por lo general menor que el 5% del valor del voltaje nominal del devanado alimentado, se obtiene una lectura del voltímetro con una flexión apropiada para el rango de voltajes que se miden.

Regulación del transformador.

La regulación de un transformador se define como la diferencia entre los voltajes secundarios en vacío y a plena carga, medidos en terminales, expresada esta diferencia como un porcentaje del voltaje a plena carga. Para el cálculo del voltaje en vacío se debe tomar en consideración el factor de potencia de la carga.

$$\% \text{Reg.} = \frac{V_{\text{vacío}} - V_{\text{carga}}}{V_{\text{carga}}} \times 100$$

POTENCIA Y RENDIMIENTO DE LOS TRANSFORMADORES MONOFASICOS Y TRIFASICOS.

La potencia de los transformadores.

Como se sabe, la potencia en corriente alterna monofásica está dada como el producto de la tensión por la corriente y por el factor de potencia, de acuerdo a la expresión.

$$P = VI \cos \theta$$

Esta fórmula expresa la "potencia real" que se mide en watts, el producto del voltaje (solo) por la corriente da la denominada potencia aparente.

$$P = VI$$

Las normas para transformadores cuando hablan de potencia nominal, se refieren a una potencia que es el producto de la corriente por el voltaje en vacío. La potencia nominal es por lo tanto una "potencia aparente" que es la misma, ya sea que se considere el devanado primario o el devanado secundario. La razón de esta definición que es sólo convencional, se debe al hecho de que se caracteriza a la máquina desde el punto de vista del dimensionamiento. Las prestaciones de una máquina eléctrica están limitadas por el calentamiento de sus componentes, las cuales está causadas por las pérdidas que tiene. En particular, en un transformador se tienen las pérdidas en el núcleo y al pérdidas en los devanados.

Para el núcleo magnético, las pérdidas dependen de la inducción magnética B, la cual es proporcional a la tensión inducida, en los devanados, las pérdidas son proporcionales al cuadrado de la corriente.

La prueba de corto circuito del transformador, permite obtener las pérdidas a plan carga con los devanados, a partir de éstas se pueden calcular para cualquier otro valor de carga.

La llamada prueba de "circuito abierto" en el transformador, permite obtener el valor de las llamadas pérdidas en vacío o pérdidas den el núcleo, que como se mencionó, consisten de dos partes, las pérdidas por histéresis y las pérdidas por corriente circulantes.

En la prueba de circuito abierto, el devanado que se alimenta es por lo general el de bajo voltaje, debido a que resulta el más conveniente par a la medición.

La eficiencia en los transformadores.

En general, la eficiencia de cualquier máquina eléctrica, se calcula como:

$$\text{Eficiente} = \frac{\text{Pot. Salida}}{\text{Pot. Entrada}} = \frac{\text{Pot. Salida}}{\text{Pot. Salida} + \text{Pérdidas}}$$

En virtud de que la capacidad de un transformador está basada en su potencia de salida, esta ecuación se puede escribir como:

$$\frac{\text{KVA salida} \times \text{FP}}{\text{Pot. Salida} + \text{Pérdidas}}$$

Eficiente = KVA salida por FP Perd. Núcleo + perd. devanados

Eficiencia diaria de los transformadores.

Dependiendo de la aplicación de los transformadores, con frecuencia se usan para operar las 24 horas por día, aún cuando la carga no sea continua en el período total de operación. En estas condiciones un transformador tiene dos conceptos de eficiencia, una global para condición de plena carga y otro para distintas cargas al día, es decir, la llamada eficiencia diaria. Esta eficiencia diaria se expresa como la relación de la energía de salida a la energía de entrada durante el período de 24 horas.

Transformadores trifásicos.

La mayoría de las redes de distribución son trifásicas y también un buen número de usuarios de tipo comercial e industrial hacen uso de sistemas de alimentación trifásicos, esto hace que sea necesario considerar la importancia que tienen los sistemas trifásicos en las instalaciones eléctricas y en consecuencia los transformadores trifásicos en estas.

La energía de un sistema trifásico se puede transformar, ya sea por medio de tres transformadores monofásicos (formando un banco trifásico) o bien mediante el uso de un transformador trifásico. Por razones de tipo económico, de espacio en las instalaciones y confiabilidad en los equipos, se puede decir, que en general, es preferida la solución del uso de transformadores trifásicos en las instalaciones eléctricas que requieren de este tipo de alimentación.

Los transformadores trifásicos normalmente están constituidos de un núcleo que tiene 3 piernas o columnas, sobre cada una de las cuales se encuentra dispuestas los devanados primarios y secundarios de la misma fase. Estos devanados para cada una de las fases ese pueden conectar en estrella, delta a Zig-Zag.

La conexiones entre los devanados secundarios pueden ser iguales o distintas de aquellas que se usen entre las fases del primario por lo que en teoría puede haber nueve combinaciones de conexión. En la práctica se pueden usar las siguientes conexiones entre los devanados primario y secundario: Estrella-estrella, delta-estrella, estrella/zig-zag, estrella-delta, delta-delta.

Relación de transformación para los transformadores trifásicos.

Cuando los devanados primario y secundario de un transformador trifásico tienen conexiones distintas, la relación entre las dos tensiones de vacío (sin carga) en las terminales, no es igual a la relación entre las espiras de una fase primaria y secundaria. Esto depende de los tipos de conexiones que se seleccionen, debido a que, como se ha notado, cada tipo de conexión corresponde una determinada realización entre las tensiones concatenadas y las tensiones de fase.

Si se considera por ejemplo un transformador con devanado primario en delta y devanado secundario en estrella. Si se designan por V_1 y V_2 las tensiones de una fase del primario y de una fase del secundario respectivamente y con V_1 y V_2 , los voltajes concatenados (indicados) en terminales del primario y secundario, respectivamente.

En el devanado primario, por estar conectado en delta se tiene:

$$V_1 = V_1$$

En el devanado secundario conectado en estrella:

$V_2 = 3 V_2 = 1,732 V_2$, por lo tanto, la relación entre las tensiones en vacío en las terminales será:

$$\frac{V_1}{V_2} = \frac{V_1}{1,732 V_2}$$

Hasta ahora, se ha hablado de transformadores monofásicos, y en estos, la relación entre las tensiones primaria y secundaria en vacío se le conoce como "relación de transformación" (se designa con la letra A) y esta relación es válida también para el número de espiras primarias N_1 y secundarias N_2 . Si se le quiere dar el significado de relación de transformación a la relación entre espiras:

$$A = \frac{N_1}{N_2}$$

RELACIONES ENTRE LAS ESPIRAS CON RELACION AL TIPO DE CONEXIÓN DE LOS DEVANADOS.

Criterios para la selección de conexiones.

La selección de la combinación de las conexiones depende de consideraciones económicas y de las exigencias que impone la operación. Por ejemplo, en las redes de distribución que usan tres fases con neutro, es necesario el uso de devanados secundarios en estrella, ya que éstos tienen un punto accesible para el neutro.

En los transformadores con devanado primario en delta y secundario en estrella/ o con primario en estrella y secundario en Zig-Zag los desequilibrios o desbalances en la carga (cuando las fases no se encuentran igualmente cargadas), repercuten menos sobre la línea de alimentación primaria.

Con respecto a los efectos económicos, se puede decir como criterio general que los devanados en delta son más costosos que aquellos conectados en estrella, requiriéndose emplear conductores de diámetro menor o debiendo emplear un mayor número de espiras.

Defasamiento entre las fases.

En los transformadores trifásicos, tiene importancia entre otras cosas, el eventual defasamiento de fases de la tensión secundaria respecto a la tensión primaria., que puede afectar a la conexión en paralelo de los transformadores.

En los transformadores monofásicos en conexión trifásica, a los transformadores trifásicos, los devanados primario y secundario que tienen la misma conexión (por ejemplo estrella/estrella, delta/delta) la tensión secundaria puede estar sólo en fase ($A 0^\circ$) o en posición de fase, es decir, a 180° .

En cambio, los transformadores, trifásicos con conexión mixta en los devanados (por ejemplo estrella/delta, delta/estrella, estrella/zig-zag), este defasamiento angular no puede ser nunca 0° o 180° pero debe ser múltiplo de 30° .

Examinando vectorialmente todas las combinaciones de conexiones trifásicas, resulta que incluyendo el defasamiento de 0° , pueden haber 12 distintos valores de defasamiento angular de 30 grados en 30 grados, los valores más usuales de defasamiento angular se dan en la tabla.

LA CONSTRUCCION DEL TRANSFORMADOR.

Consideraciones generales.

Un transformador consta de dos partes esenciales: El núcleo magnético y los devanados, estos están relacionados con otros elementos destinados a las conexiones mecánicas y eléctrica entre las distintas partes al sistema de enfriamiento, al medio de transporte y a la protección de la máquina en general. en cuanto a las disposiciones constructivas, el núcleo determina características relevantes, de manera que se establece una diferencia fundamental en la construcción de transformadores, dependiendo de la forma del núcleo, pudiendo ser el llamado NUCLEO TIPO COLUMNAS y el NUCLEO TIPO ACORAZADO, existen otros aspectos que establecen diferencias entre tipos de transformadores, como es por ejemplo el sistema de enfriamiento, que

establece la forma de disipación del calor producido en los mismos, o bien en términos de su potencia y voltaje para aplicaciones, como por ejemplo clasificar en transformadores de potencia a tipo distribución.

La construcción del núcleo.

El núcleo magnético está formado por laminaciones de acero que tienen pequeños porcentajes de silicio (alrededor del 4%) y que se denominan "laminaciones magnéticas", estas laminaciones tienen la propiedad de tener pérdidas relativamente bajas por efecto de histéresis y de corrientes circulantes.

Están formados por un conjunto de laminaciones acomodadas en la forma y dimensiones requeridas. La razón de usar laminaciones de acero al silicio en los núcleos de las máquinas eléctricas, es que el silicio aumenta la resistividad del material y entonces hace disminuir la magnitud de las corrientes parásitas o circulantes y en consecuencia las pérdidas por este concepto.

En el caso de transformadores de gran potencia, se usan las llamadas "laminaciones de cristal orientado" cuyo espesor es de algunos milímetros y contienen entre 3% y 4% de silicio, se obtienen de material laminado en caliente, después se hace el laminado en frío, dando un tratamiento térmico final a la superficie de las mismas. Este tipo de laminación cuando se sujetan al flujo en la dirección de las laminaciones, presentan propiedades magnéticas mejores que la laminación "normal" de acero al silicio usada para otro tipo de transformadores.

Elementos de los núcleos de transformadores.

En los núcleos magnéticos de los transformadores tipo columna se distinguen dos partes principales: "las columnas" o piernas y los "yugos". En las columnas se alojan los devanados y los yugos unen entre sí las columnas para cerrar el circuito magnético.

Debido a que las bobinas se deben montar bajo un cierto procedimiento y desmontar cuando sea necesario por trabajos de mantenimiento, los núcleos que cierran el circuito magnético, terminan al mismo nivel en la parte que está en contacto con los yugos, o bien con salientes. En ambos casos los núcleos se arman con "juegos" de laminaciones para columnas y yugos que se arman por capas de arreglos "pares" e "impares".

Cuando se emplean laminaciones de cristal orientado, es necesario que las uniones entre yugos y columnas se realicen con cortes inclinados para evitar trayectorias transversales de las líneas de flujo respecto a tales direcciones.

Cuando se han armado los niveles a base de juegos de laminaciones colocadas en "pares" e "impares" el núcleo se sujeta usando tornillos opresores y separa por medio de los tornillos tensores.

En cuanto a los Yugos, se refiere, no estando vinculados estos con los devanados, pueden ser, entonces, rectangulares, aún cuando pueden tener también escalones para mejorar el enfriamiento.

Tipos de núcleos.

Cuando se ha mencionado con anterioridad, los núcleos para transformadores se agrupan básicamente en las siguientes categorías:

- a) Tipo núcleo o de columnas.
- b) Tipo acorazado.
- c) Tipo núcleo o de columnas.

Existen distintos tipos de núcleos tipo columna, que están caracterizados por la posición relativa de las columnas y de los yugos.

Núcleo monofásico.

Se tienen dos columnas unidas en las partes inferior y superior por medio de un yugo, en cada una de estas columnas se encuentran incrustados la mitad del devanado primario y la mitad del devanados secundario.

Núcleo trifásico.

Se tienen tres columnas dispuestas sobre el mismo plano unidas en sus partes inferior y superior por medio de yugos. Sobre cada columna se incrustan los devanados primarios y secundario de una fase. Las corrientes magnetizantes de las tres fases son distintas entre sí, debido principalmente a que el circuito magnético de las columnas externas es más largo que el correspondiente a la columna central. Este desequilibrio, tomando en cuenta que la corriente magnetizantes de las tres fases son distintas entre sí, debido principalmente que el circuito magnético de las columnas externas es más largo que el correspondiente a la columna central. Este desequilibrio, tomando en cuenta que la corriente de vacío es bastante baja, tiene influencia solamente para las condiciones de operación en vacío.

Tipo acorazado.

Este tipo de núcleo acorazado, 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, y cuando se trata de transformadores pequeños, las laminaciones se hacen en troqueles. Las formas de construcción pueden ser distintas y varían de acuerdo con la potencia.

Herrajes o armadura.

Como se ha mencionado antes, los núcleos de los transformadores tienen partes que cumplen con funciones puramente mecánicas de sujeción de las laminaciones y estructuras, estas partes o elementos se conocen como "herrajes" o armadura y se complementan con componentes como fibra de vidrio o madera para protección de la sujeción de los yugos.

Los devanados de los transformadores.

Los devanados de los transformadores se pueden clasificar en baja y alta tensión, esta distinción es de tipo global y tiene importancia para los propósitos de la realización práctica de los devanados debido a que los criterios constructivos para la realización de los devanados de baja tensión, son distintos de los usados para los devanados de alta tensión.

Para los fines constructivos, no tiene ninguna importancia la función de un devanado, es decir, que sea primario o el secundario, importa solo la tensión para la cual debe ser previsto.

Otra clasificación de los devanados se puede hacer con relación a la potencia del transformador, para tal fin existen devanados para transformadores de baja potencia, por ejemplo de 1000 a 2000 VA y para transformadores de media y gran potencia. Los devanados para transformadores de pequeña potencia son los más fáciles de realizar.

En este tipo de transformadores los devanados primario y secundario son concéntricos y bobinado sobre un soporte aislante único. Por lo general, se usan conductores de cobre esmaltado, devanados en espiral y con capas sobrepuestas. Por lo general, el devanado de menor tensión se instala más cerca del núcleo interponiendo un cilindro de papel aislante y mediante separadores, se instala en forma concéntrica el devanado de tensión mayor. Los extremos de los devanados (denominados también principio y final del devanador) se protegen con aislante de forma de tubo conocido como "spagueti".

Devanados para transformadores de distribución.

En estos transformadores, la diferencia entre las tensiones primaria y secundaria es notable, por ejemplo, los transformadores para redes de distribución de 13200 volts a las tensiones de utilización de 220/127 volts debido a estas diferencias, se emplean criterios constructivos distintos a los considerados en los transformadores pequeños de baja tensión y se dividen en devanados de baja tensión y de alta tensión.

Devanados de baja tensión.

Están constituidos por lo general, de una sola espiral (algunas veces en dos o tres capas sobrepuestas), con alambres rectangular aislado. El conductor se usa generalmente para potencias pequeñas y tiene diámetros no superiores a 3 o 3.5 mm. El aislamiento de los

conductores, cuando son cilíndricos, puede ser de algodón o de papel, más raramente conductor esmaltado en el caso que los transformadores que no sean enfriados por aceite.

Para transformadores de mediana y gran potencia, se recurre al uso de placa o solera de cobre aislada, el aislamiento es por lo general de papel. En el caso de que las corrientes que transporte el devanado sean elevadas ya sea por vacilidad de manipulación en la construcción o bien para reducir las corrientes parásitas, se puede construir el devanado don más de una solera o placa en paralelo.

Devanados de alta tensión.

Los devanados de alta tensión, tiene en comparación con los de baja tensión, muchos espiras, y la corriente que circula por ellos, es relativamente baja, por lo que son de conductor de cobre de sección circular con diámetro de 2.5 a 3.0 mm.

Con respecto a las características constructivas, se tienen variantes de fabricante a fabricante, hay básicamente dos tipos, el llamado "tipo bobina" formados de varias capas de conductores, estas bobinas tienen forma discoidal, estas bobinas se conectan, por lo general, en serie para dar el número total de espiras de una fase. El otro tipo des el llamado "de capas" constituido por una sola bobina con varias capas, esta bobina es de longitud equivalente a las varias bobinas discoidales que constituirían 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.

Como aspectos generales, se puede decir que el primer tipo (bobinas discoidales), da mayor facilidad de enfriamiento e impregnarse de aceite, debido a que dispone canales de circulación más numerosos, también tiene la ventaja de que requiere de conductores de menor diámetro equivalente al otro tipo, da mayor facilidad constructiva. Tiene la desventaja de ser más tardado en su construcción.

Las bobinas discoidales se conocen también como "tipo galleta" en algunos casos, se forman cada una, de un cierto número de conductores dispuestos en capas y aisladas estas capas entre sí por papel aislante, cada bobina al terminar se "amarra" con cinta de lino o algodón para darle consistencia mecánica y posteriormente se les da un baño de barniz y se hornean a una cierta temperatura, con lo cual adquiere la rigidez mecánica necesaria. Cada bobina, está diseñada para tener una tensión no superior a 1000-1500 volts, por lo que para dar la tensión necesaria para una fase, se deben colocar varias bobinas en serie.

Posición de los devanados.

La disposición de los devanados en los transformadores, debe ser hecha de tal forma, que se concilien en la mejor forma las dos exigencias que son contrastantes entre sí, del aislamiento y de la menor dispersión del flujo. La primera requiere de la mayor separación entre devanados, en tanto que la segunda, requiere que el primario s encuentra los más cercano posible del secundario,. En la práctica, se alcanza una solución conveniente del problema con la disposición de los devanados dentro e los siguientes tipos:

- Concéntrico.
- Concéntrico doble.
- Alternado.

En el tipo concéntrico, cada uno de los devanados está distribuido a lo largo de toda la columna el devanado de tensión más baja se encuentra en al parte interna (más cercan al núcleo) y aislado del núcleo, y del de tensión más elevada, por medio de tubos aislantes (cartón baquelizado, baquelita, etc.).

En la disposición de concéntrico doble, el devanado de tensión más de baja se divide en dos mitades dispuestas respectivamente al interior y al exterior uno de otro.

En el llamado tipo alternado, los dos devanados están subdivididos cada uno en una cinta número de bobinas que están dispuestas en las columnas en forma alternada.

Las consideraciones que orientan desde el punto de vista de diseño, la disposición de los devanados, son aquellos referentes al enfriamiento, el aislamiento, la reactancia de dispersión y a los esfuerzos mecánicos.

Con relación a los aislamientos, la solución más conveniente la representa el tipo concéntrico simple, porque requiere de una sola capa aislante entre los dos devanados, por lo que esta disposición es ventajosa en el caso de tensiones elevadas.

El llamado concéntrico doble tiene la prerrogativa de dar lugar a la reactancia de dispersión con valor de alrededor de la mitad de aquel relativo al concéntrico simple. El tipo alternado, en cambio, permite variar tales reactancias, repartiendo en forma distinta las posiciones de las bobinas de los dos devanados.. para los esfuerzo mecánicos son mejor las disposiciones de tipo alternado, pues permite que el transformador soporte mejor los esfuerzos mecánicos.

Construcción de los devanados.

Como se indicó anteriormente, los conductores usados para la construcción de los devanados, pueden ser de alambre circular (como un diámetro comprendida entre 0.2 y 0.4 mm) o bien solera de distintas medidas.

Según sea el tipo de las espiras de las bobinas, se pueden construir en dos formas.

- Helicoidal continua.
- Con bobinas separadas (discoidales).

Las bobinas helicoidales se hacen, por lo general, cuando el conductor empleado es de solera, lo único que se debe tener cuidado es en la forma del aislamiento con respecto al núcleo y eventualmente su constitución mecánica. Este tipo de construcción tiene cierto tipo de limitaciones, en cuanto al aislamiento se refiere, aún cuando se puede construir en varias capas, por lo que su práctica se limita a los devanados de baja tensión.

La construcción de bobinas discoidales (para devanados con bobinas separadas), generalmente se hace con el mismo número de espiras por bobinas y de capas se hace de manera que se limite la tensión máxima entre espiras de capas adyacentes a una valor entre 200 y 300 volts, con esto se espera que en general, y sólo en casos excepcionales, el voltaje por bobina sea cuando mucho 1000 volts entre capas separadas por papel aislante.

Con relación a la posición de los devanados, los transformadores son de dos tipos: de devanados concéntricos y devanados alternados.

En el caso de los transformadores con devanados concéntricos, estos, los devanados primario y secundario, son completamente distintos y se encuentran montados uno dentro del otro sobre el núcleo, estando, por razones de aislamiento, principalmente el devanado de menor voltaje más cerca del núcleo.

En transformadores de mayor potencia y sólo excepcionalmente, se puede dividir el devanado de bajo voltaje en dos partes, de manera que uno quede cercano al núcleo y la otra se coloque sobre el devanado de alta tensión, es decir, es un doble concéntrico.

La disposición de los devanados concéntrica, es la que tiene un mayor campo de aplicación.

Cualquiera que sea el tipo de devanado, la construcción de las bobinas se hace normalmente sobre moldes de madera o metálicos montados sobre bobinadoras o devanadoras cuyo tipo es distinto, dependiendo principalmente del tamaño de bobinas por construir. En el caso de bobinas para transformadores pequeños, que se pueden hacer en talleres de bobinado, estas bobinas son de tipo manual, y eventualmente se pueden llegar a usar tornos.

Cuando se termina de devanar una bobina, antes su montaje se le debe dar un tratamiento como secarla en vacío para quitar posibles restos de humedad, y también un

proceso de impregnación de barniz aislante y horneado a una temperatura que depende del tipo de barniz y cuyo objetivo es dar consistencia mecánica.

Aislamiento externo de los devanados.

Los devanados primario y secundario, deben estar aislados entere sí, generalmente este aislamientos de por medio de separadores de madera, baquelita o materiales aislantes similares que además cumplan con funciones refrigerantes.

SISTEMA DE AMARRE AXIAL DE LOS DEVANADOS MEDIANTE TORNILLOS OPUESTOS DE PRESION.

El aislamiento entre las fase de los transformadores trifásicos se efectúa separando convenientemente las columnas, entre las cuales se interponen algunas veces separadores o diafragmas de cartón tratado o bien de baquelita.

El aislamiento externo entre las fases, se logra por medio de las boquillas a las que se conectan las terminales de los devanados.

Conexiones de los devanados.

Cuando se construye un devanado, se puede bobinar en el sentido a la derecha o a la izquierda (con respecto al sentido de las manecillas del reloj), se ha observado que una corriente que tiene un determinado sentido, produce un flujo magnético en sentido opuesto, se tiene un devanado construido hacia la izquierda o un devanado hacia la derecha, esto se debe tomar en consideración, para evitar que con la conexiones que se realicen, se tengan flujos opuestos o voltajes inducidos opuestos. En general, cada fabricante adopta un sentido único de devanado para todas las bobinas, tanto secundarias como primarias.

En los transformadores monofásicos de dos columnas, el flujo es directo y en sentido opuesto en las dos columnas, esto significa que debe haber una forma de conexión.

Cambio en al relación de transformación.

En una red de distribución, la tensión no es exactamente la misma en todos los puntos, debido a que la caída de tensión depende de la distancia del punto de alimentación y de la magnitud de la carga. Para poder emplear los transformadores de distribución en los distintos puntos de la red y adaptarlos a las variaciones tensión, se provee uno de los devanados de un cambiador de derivaciones (El de alta tensión) de tal forma que se puedan aumentar o disminuir el número de espiras y en consecuencia, variar la relación de transformación dentro de límites establecidos, estos límites, normalmente son del 5%.

MATERIALES ELECTRICOS USADOS EN LA CONSTRUCCION DE TRANSFORMADORES.

Conductores eléctricos.

Los materiales usado como conductores en los transformadores, al igual que los usados en otras máquinas eléctrica, deben ser de alta conductividad, ya que con ellos se fabrican las bobinas. Los requisitos fundamentales que deben cumplir los materiales conductores, son los siguientes:

1. La más alta conductividad posible.
2. El menor coeficiente posible de temperatura por resistencia eléctrica.
3. Una adecuada resistencia mecánica.
4. Deben ser ductibles y maleables.
5. Deben ser fácilmente soldables.
6. Tener una adecuada resistencia a la corrosión.

La resistividad o resistencia específica, al tensión disruptiva, la permitividad y la histéresis dieléctrica en adición a las propiedades dieléctricas se deben considerar también las propiedades mecánicas y su capacidad para soportar la acción de agentes químicos, el calor y otros elementos presentes durante su operación.

La temperatura y los materiales aislantes.

Uno de los factores que más afectan la vida de los aislamientos, es la temperatura de operación de las máquinas eléctricas, esta temperatura está producida principalmente por las pérdidas y en el caso específico de los transformadores, durante su operación, estas pérdidas están localizadas en los siguientes elementos principales:

El núcleo o circuito magnético, aquí las pérdidas son producidas por el efecto de histéresis y las corrientes circulantes en las laminaciones, son dependientes de la inducción, es decir, que influye el voltaje de operación.

Los devanados, aquí las pérdidas se deben principalmente al efecto joule y en menor medida por corrientes de Foucault, estas pérdidas en los devanados son dependientes de la carga en el transformador.

Se presentan también pérdidas en las uniones o conexiones que se conocen también como "puntos calientes" así como en los cambiadores de derivaciones.

Todas estas pérdidas producen calentamiento en los transformadores, y se debe eliminar este calentamiento a valores que no resultan peligrosos para los aislamientos, por medio de la aplicación de distintos medios de enfriamiento.

Con el propósito de mantener en forma confiable y satisfactoria la operación de las máquinas eléctricas, el calentamiento de cada una de sus partes, se debe controlar dentro de ciertos límites previamente definidos. Las pérdidas en una máquina eléctrica son importantes no tanto porque constituyan una fuente de ineficiencia, sino porque pueden representar una fuente importante de elevación de temperatura para los devanados, esta elevación de temperatura puede producir efectos en los aislamientos de los propios devanados, o bien en los aislamientos entre devanados y el núcleo, por esta razón, es siempre importante que todos los aislamientos entre devanados y el núcleo, por esta razón, es siempre importante que todos los aislamientos ese mantengan dentro de los límites de temperatura que garanticen su correcta operación, sin perder su efectividad.

Como la elevación en la temperatura depende también de la carga en las máquinas dentro de sus límites de carga o "cargabilidad" establecidos, para así respetar los límites de temperatura de sus aislamientos.

En su régimen nominal de operación, un transformador tiene estrechamente, ligado su voltaje y potencia a los límites impuestos por los aislamientos usados y en menor grado por las pérdidas por efecto joule.

Calificación de los materiales aislantes.

La clasificación de los materiales aislantes para máquinas eléctricas con relación a su estabilidad termal, cubre básicamente siete clases de materiales aislantes que se usan por lo general y que son las siguientes:

CLASE	TEMPERATURA
Y	90 °C
A	105 °C
E	120 °C
B	130 °C
F	155 °C
H	180 °C
C	Mayor a 180 °C

Una descripción breve de estos materiales se dan a continuación:

Clase Y.

Este aislamiento consiste de materiales o combinaciones de materiales, tales como algodón, seda y papel sin impregnar.

Clase A.

Este aislamiento consiste de materiales o combinaciones de materiales tales como el algodón, seda y papel con alguna impregnación o recubrimiento o cuando se sumergen en dieléctricos líquidos tales como aceite. Otros materiales o combinación de materiales que caigan dentro de estos límites de temperatura, pueden caer dentro de esta categoría.

Clase E.

Este aislamiento consiste de materiales o combinaciones de materiales que por experiencia o por pruebas, pueden operar a temperaturas hasta de 5 °C, sobre el temperatura de los aislamientos Clase A.

Clase B.

Este aislamiento consiste de materiales o combinaciones de materiales tales como la mica, fibra de vidrio, asbestos, etc. con algunas sustancias aglutinantes, pueden haber otros materiales inorgánicos.

Clase F.

Este aislamiento consiste en materiales o combinaciones de materiales tales como mica, fibra de vidrio, asbestos, etc., con sustancias aglutinables, así como otros materiales o combinaciones de materiales no necesariamente inorgánicos.

Clase H.

Este aislamiento consiste de materiales tales como el silicón, elastómetros y combinaciones de materiales tales como la mica, la fibra de vidrio, asbestos, etc., con sustancias aglutinables como son las resinas y silicones apropiados.

Clase C.

Este aislamiento consiste de materiales o combinaciones de materiales tales como la mica, la porcelana, vidrio, cualzo con o sin aglutinantes.

Métodos de enfriamiento de transformadores de potencia.

Como ya se mencionó antes, el calor producido por las pérdidas en los transformadores afecta la vida de los aislamientos, por esta razón es importante que este calor producido disipe de manera que se mantenga dentro de los límites tolerables por los distintos tipos de aislamiento.

La transmisión del calor tiene las etapas siguientes en los transformadores:

- Conducción a través del núcleo, bobinas y demás elementos hasta la superficie.
- Transmisión por convección en el caso de los transformadores secos.
- Para los transformadores en aceite, el calor se transmite por convección a través de este dieléctrico.

Los límites de calentamiento para los transformadores se dan a continuación:

PARTE DEL TRANSFORMADOR	MODO DE ENFRIAMIENTO	CLASE DE AISLAMIENTO (POR TEMPERATURA)	CALENTAMIENTO °C
-------------------------	----------------------	--	------------------

Devanados	Por aire, natural o con ventilación rozada	A E B F H C	60 75 80 100 125 150
a) Circuito magnéticos y otras partes. b) Sin estar en contacto con los devanados			a) Los mismos valores que para los devanados. b) Valores similares a las partes aislantes susceptibles de entrar en contacto con los devanados.

Líquidos refrigerantes y aislantes.

El calor producido por las pérdidas se transmite a través de un medio al exterior, este medio puede ser aire o bien líquido.

La transmisión del calor se hace por un medio en forma más o menos eficiente, dependiendo de los siguientes factores:

- La más volumétrica.
- El coeficiente de dilatación térmica.
- La viscosidad.
- El calor específico
- La conductividad térmica.

En condiciones geométricas y térmicas idénticas, el aceite es mejor conductor térmico que el aire, es decir resulta más eficiente para la disipación del calor.

Dignación de los métodos de enfriamiento.

Los transformadores están por lo general enfriados por aire o aceite y cualquier método de enfriamiento empleado debe ser capaz de mantener una temperatura de operación suficientemente baja y prevenir "puntos calientes" en cualquier parte del transformador. El aceite se considera uno de los mejores medios de refrigeración que tiene además buenas propiedades dieléctricas y que cumple con las siguientes funciones:

- Actúa como aislante eléctrico.
- Actúa como refrigerante.
- Protege a los aislamientos sólidos contra la humedad y el aire.

Con relación a la transferencia del calor específicamente, las formas en que se puede transferir por un transformador son las siguientes:

Radiación.

Es la emisión o absorción de ondas electromagnéticas que se desplazan a la velocidad de la luz y representa en temperaturas elevadas un mecanismo de pérdida de calor. En el caso de los transformadores, la transferencia del calor a través del tanque y los tubos radiadores hacia la atmósfera es por radiación.

La selección del método de enfriamiento de un transformador es muy importante, ya que la disipación del calor, como ya se mencionó antes, influye mucho en su tiempo de vida y capacidad de carga, así como en el área de su instalación y su costo,. De acuerdo a las normas americanas (ASA C57-1948) se han normalizado definido algunos métodos básicos de enfriamiento, mismos que se usan con la misma designación en México y son los siguientes:

1. Tipo AA.

Transformadores tipo seco con enfriamiento propio, estos transformadores no contienen aceite ni otros líquidos para enfriamiento, el aire es también el medio aislante que rodea el núcleo y las bobinas, por lo general se fabrican con capacidades inferiores a 2000 kVA y voltajes menores de 15 kV.

2. Tipo AFA.

Transformadores tipo seco con enfriamiento por aire forzado, se emplea para aumentar la potencia disponible de los tipo AA y su capacidad se basa en la posibilidad de disipación de calor por medio de ventiladores o sopladores.

3. Tipo AA/FA.

Transformadores tipo seco con enfriamiento natural y con enfriamiento por aire forzado, es básicamente un transformador tipo AA al que se le adicionan ventiladores para aumentar su capacidad de disipación de calor.

4. Tipo OA

Transformador sumergido en aceite con enfriamiento natural, en estos transformadores el aceite aislante circula por convección natural dentro de una tanque que tiene paredes lisas o corugadas o bien provistos con tubos radiadores. Esta solución se adopta para transformadores de más de 50 kVA con voltajes superiores a 15 kV.

5. Tipo OA/FA

Transformador sumergido en líquido aislante con enfriamiento propio y con enfriamiento por aire forzado, es básicamente un transformador OA con la adición de ventiladores para aumentar la capacidad de disipación de calor en las superficies de enfriamiento.

6. Tipo OA/FOA/FOA.

Transformador sumergido en líquido aislante con enfriamiento propio/con aceite forzado – aire forzado/con aceite forzado/aire forzado.

Con este tipo de enfriamiento se trata de incrementar el régimen de operación (carga) de transformador tipo OA por medio del empleo combinado de bombas y ventiladores. El aumento de la capacidad se hace en dos pasos: en el primero se usan la mitad de los radiadores y la mitad de las bombas con lo que se logra aumentar en 1.33 veces la capacidad del tipo OA, con el segundo paso se hace trabajar la totalidad de los radiadores y bombas con lo que se logra un aumento de 1.667 veces la capacidad del OA. Se fabrican en capacidades de 10000 kVA monofásicos 15000 kVA trifásicos.

7. Tipo FOA.

Sumergido en líquido aislante con enfriamiento por aceite forzado y de aire forzado. Estos transformadores pueden absorber cualquier carga de pico a plena capacidad ya que se usa con los ventiladores y las bombas de aceite trabajando al mismo tiempo.

8. Tipo OW.

Sumergido en líquido aislante con enfriamiento por agua, en estos transformadores el agua de enfriamiento es conducida por serpentines, los cuales están en contacto con el aceite aislante del transformador y se drena por gravedad o por medio de una bomba independiente, el aceite circula alrededor de los serpentines por convección natural.

Tipo FOW.

Transformador sumergido en líquido aislante con enfriamiento de aceite forzado y con enfriadores de agua forzada. Este tipo de transformadores es prácticamente igual que el FO, sólo que el cambiador de calor es del tipo agua – aceite y se hace el enfriamiento por agua sin tener ventiladores.

FUNDAMENTOS DE CALCULO DE TRANSFORMADORES

Introducción.

El cálculo o diseño de transformadores se puede decir que es un aspecto suficientemente tratado, en el que intervienen algunas variantes dependiendo del tipo de transformador y de los materiales empleados. En la actualidad los fabricantes de transformadores a gran escala, disponen por lo general de programas par computadora para diseño y de laboratorio apropiados prueba y desarrollo.

No obstante, los conceptos básicos del cálculo de transformadores se deben conocer por las personas relacionadas con las máquinas eléctricas, ya que esto no solo permite una mejor comprensión de su funcionamiento, sino también se está en posibilidad de entender mejor las posibles falla que tienen y su reparación.

DIMENSIONAMIENTO DE LAS PARTES ACTIVAS DEL TRANSFORMADOR

Como se sabe, los transformadores están constituidos principalmente por el núcleo y los devanado (bobinas), en principio el tratamiento para el cálculo de las características del núcleo corresponde al que se da para el cálculo de un circuito magnético, es decir se parten de los mismos conceptos y bases para el cálculo de un reactor, y en parte, un electroimán. Los conceptos básicos de cálculo están dados por "la densidad de flujos magnético" (B_M) expresada en Weber/M² y el flujo magnético (ϕ_M) expresado en Weber, de andar que la sección de un núcleo magnético se puede calcular como:

$$S = \frac{\phi_M}{B_M}$$

Partiendo del hecho que se ha fijado la densidad de flujo B_M con un cierto criterio de conveniencia que toma en consideración la potencia del transformador, las pérdidas en los materiales y el sistema de enfriamiento empleado como medida de orientación, se da la tabla siguiente en donde se da el valor medio de la inducción en función de la potencia.

POTENCIA DEL TRANSFORMADOR EN kVA	DENSIDAD DE FLUJO B_M (WEBER/M ²)
5 - 10	1.10 - 1.20
10 - 20	1.15 - 1.25
20 - 50	1.20 - 1.30
50 - 200	1.25 - 1.35
200 - 500	1.30 - 1.40
MÁS DE 500	1.35 - 1.50

Cuando es usa laminación de cristal orientado e puede tener una inducción hasta de e1.6 Weber/M².

Determinación del flujo.

Si se desprecia la caída de tensión en el secundario del transformador se puede escribir que:

$$V_S = E_S = 4.44 f N_S \phi_M$$

Donde:

$$N_S = \text{NUMERO DE ESPIRAS DEL DEVANADO SECUNDARIO.}$$

Si se multiplica ambos miembros de la expresión anterior por I_S (la corriente nominal secundaria) se obtiene la potencia nominal.

$$PN = V_s I_s = 4.44 f N_s I_s \phi M$$

En la expresión anterior al producto $N_s I_s$ se le puede sustituir por la relación $\phi M/K$, donde $K = \phi M/N_s I_s$ que se conoce como "el factor de flujo" y que depende del tipo, la potencia y tipo de enfriamiento del transformador. Con esta sustitución se tiene:

$$P = 4.44 f \frac{\phi M^2}{K}$$

Si se expresa la potencia en kVA, desarrollando se obtiene la siguiente expresión:

$$\phi m = \frac{kf}{\sqrt{F}} \sqrt{PN}$$

Donde la constante KF es:

$$KF = \frac{1000 K}{4.44}$$

Para una frecuencia de 60Hz se puede escribir:

$$\phi M = 10^{-2} C \sqrt{PM}$$

Para la constante C se pueden adoptar los valores dados en la tabla.

VALORES DE LA CONSTANTE C PARA EL CALCULO DEL FLUJO.

TIPO DE TRANSFORMADOR		CONSTANTE C
MONOFASICO	TIPO COLUMNAS	0.13 - 0.20
	ACORAZADO	0.26 - 0.39
TRIFASICO	TIPO COLUMNAS	0.16 - 0.23
	ACORAZADO	0.39 - 0.52

A los valores más bajos de C corresponden a los valores mayores del número de espiras de los devanados. Un dimensionamiento bien hecho debe conciliar necesariamente los factores técnico - económicos.

Después de haber determinado el valor de la sección y establecida la forma (según sea el caso, cruciforme o de cruz o de escalone) se obtiene el radio de la circunferencia circunscrita, tomando en consideración el factor de empaquetamiento (al atornillar el núcleo con herrajes o tornillos) y cuyos valores son:

- 0.86 - 0.90 para laminaciones aisladas con papel.
- 0.90 - 0.92 para laminaciones aisladas en barniz.
- 0.85 - 0.90 para núcleos con escalones.

Para transformadores de núcleo acorazado, al sección del núcleo es normalmente rectangular.

Cálculo del numero de espiras.

Se parte de la fórmula $V = 4.44 fN \phi M$, para el devanado primario se considera el voltaje inducido o fuerza electromotriz igual a la tensión aplicada, despreciando así la caída de tensión. En los transformadores trifásicos al tensión a considera es la de fase. En la fórmula anterior, conviene recordar que N representa "el número total de espiras por fase". Por lo tanto cuando hay espiras formadas por conductores en paralelo, se consideran como una sola vuelta.

Si se divide la tensión por fase ente el número de espiras en serie por fase se obtiene el número de volt/espira, est valor par aun mismo tipo de transformador va aumentando con la potencia. Por ejemplo, para un transformador trifásico del tipo columna enfriado por aire, por una potencia de 1 kVA se puede tener de 0.25 - 0.5 Volt/espira, en tanto que para una potencia de 100 kVA, tales valores pueden estar entre 3.2 y 5.5 volts/espira.

Desde el punto de vista de diseño, una vez que se determina el número de espiras, se calculan los volts/espira, que deben están dentro de los límites establecidos por los fabricantes. Los valores medios a considerar para transformadores de pequeña y media potencia se indican en la tabla siguiente:

VALORES MEDIOS DE VOLTS/ESPIRA EN FUNCION DE LA POTENCIA.

POTENCIA EN kVA	VOLTS/ESPIRA
1	0.3 - 0.6
5	0.7 - 1.1
10	1.0 - 1.6
25	1.6 - 2.5
50	2.3 - 3.5
75	2.7 - 4.5
100	3.2 - 5.5

Para otro tipo de transformadores los valores anteriores se modifican por coeficientes para cada caso. Tales coeficientes son:

- Para transformadores monofásicos en aire del tipo columna 1.2.
- Para transformadores monofásicos en aceite del tipo columna 1.35.
- Para transformadores monofásicos de tipo núcleo acorazado 2.5 - 3.0.
- Para transformadores en aire tipo columna 0.85.
- Para transformadores en aire acorazado 1.3 - 1.6.

Otro elemento importante a considerar esta dado por la limitación de la diferencia de potencial entre la primera espira de una capa de una bobina y la capa adyacente, constituida por la última espira de la capa anterior o la siguiente. Esta diferencia de potencial se debe mantener entre 200 y 300 volts.

Densidad de corriente.

La densidad de corriente (expresada en amperes/MM²) en los conductores usados en la fabricación de formadores depende desde luego de la sección o área de los conductores, pero para un cierto conductor dado, esencialmente depende del tipo de enfriamiento usado. Los valores de orden de magnitud que se recomienda usar son los que se, indican a continuación:

Transformadores enfriados por aire	Con enfriamiento natural	1.1 - 1.6
	A/MM ²	
Transformadores enfriados por aceite	Con enfriamiento natural	2.5 - 2.8
	A/MM ²	
	Con enfriamiento forzado	2.8 - 4.0
	A/MM ²	

Relación entre las pérdidas en el fiero y las pérdidas en el cobre (devanados).

La condición de rendimiento máximo en un transformador se tiene cuando las llamadas pérdidas en vacío en el fiero y las pérdidas en los devanados (en el cobre) son iguales. Como en la práctica los transformadores es muy raro que trabajen con carga constante, por lo general es mayor el tiempo que operan con carga debajo de su valor nominal, que aquel que opera a plena carga, entonces la relación $P_{\text{vacío}}/P_{\text{cobre}}$ es menor que la unidad, y es tanto más pequeña respecto a la unidad, mientras sea mayor el tiempo de funcionamiento a carga reducida. Para tomar en consideración el efecto de variación de la resistencia por temperatura, para corregir las pérdidas en los devanados se puede considerar un coeficiente K_m igual a 1.1.

Los amperes – espira por unidad de longitud en la columna.

Para determinar la altura h de las columnas o bien para verificar el valor obtenido en base al diámetro de la circunferencia circunscrita a la sección de éste, sirve el parámetro de los amperes – espira.

$$\text{Ampere – Espira/cm} = \frac{N_1 I_1}{h} = \frac{N_1^2 I_1^2}{H}$$

De donde:

$$H \text{ (CM)} = \frac{\text{Amp – espira}}{\text{Amp – espira/cm}}$$

N_1 y N_2 son las espiras en serie por fase del primario y secundario respectivamente, y las corrientes primario y secundario son I_1 e I_2 respectivamente. Para que el dimensionamiento del núcleo sea bien realizado, es necesario que el valor de tal parámetro se encuentre dentro de los límites de la práctica constructiva que indica las conveniencias para los distintos tipos de transformadores en función de la potencia. Tales límites de valores medios se dan en la tabla siguiente:

VALORES MEDIOS DE AMPERE – ESPIRA/CENTIMETRO EN FUNCION De LA POTENCIA Y TIPO DE TRANSFORMADORES

POTENCIA (Kva)	AMPERE – ESPIRA/CENTIMETROS			
	TRIFASICOS		MONOFASICOS	
	TIPO COLUMNA	ACOCARAZADOS	TIPO COLUMNA	ACORAZADOS
1	50 – 66	65 – 83	60 – 80	100 – 130
5	85 – 100	110 – 130	100 – 120	170 – 200
10	95 – 120	124 – 156	115 – 140	190 – 240
50	150 – 200	196 – 260	180 – 240	300 – 400
100	170 – 250	220 – 320	200 – 240	340 – 500
500	230 – 300	300 – 390	270 – 360	460 – 600
1000	280 – 370	360 – 480	430 – 570	460 – 600
5000	420 – 500	550 – 650	500 – 600	560 – 740
10000	550 – 650	720 – 850	660 – 780	840 – 1000
				1100 – 1300

Aislamiento entre devanados y entre devanados y el núcleo.

El aislamiento entre los devanados y entre estos y el hierro del núcleo sobre el cual se encuentran devanados, se puede hacer de distintas formas, según sea el tipo de transformador.

Salvo en los casos de transformadores de potencia muy pequeña y del tipo núcleo acorazado, el aislamiento se logra siempre por medio de tubos aislantes (de papel baquelizado, gelonita y similares) por otra parte, la limitada rigidez dieléctrica del aire, la presencia de polvos y al humedad, hacen que sea preferente el uso de transformadores en aceite durando la tensión sobrepasa los 4 a 6 kV.

Naturalmente que con el aumento de tensión, el espesor de los aislamientos aumente, por lo tanto, considerando que el uso de espesores notables para los tubos aislantes, encuentra ciertas limitaciones ya sea para la fabricación como para el comportamiento del material a las sollicitaciones dieléctricas, para tensiones de 30 a 40 kV, en lugar de un tubo se tienden dos o más concéntricos entre los cuales se deja una distancia de la menos 10 o 15 mm para permitir la circulación del aceite interpuesto y por lo tanto el enfriamiento. En este caso el espesor los tubos se hace de 3 a 5 mm. Para tensiones de operación hasta 40 de kV, los espesores de los tubos se adoptan como los antes indicados. En la tabla siguiente se da como una medida de orientación la relación entre el espesor del tubo (en mm) y al tensión de operación (en kV).

ESPESOR DE TUBOS AISLANTES CONTRA TENSION DE OPERACION EN TRANSFORMADORES.

ESPESOR DEL TUBO (MM)	TENSION DE OPERACIÓN (Kv)
4	10
5	15
6	20
7	25
8	30
10	40

Cuando los tubos se subdividen, el espesor del conjunto aislante (tubo – aceite) se puede calcular prácticamente con la expresión:

$$De = 0.06V (CM)$$

Donde:

V = Máxima tensión de los devanados, expresados, expresada en Kv.

Todo lo mencionado anteriormente es aplicable tanto al aislamiento entere devanados, como al aislamiento con respecto al núcleo.

DISTANCIAS ENTRE DEVANADOS Y EL YUGO Y ENTRE LOS DEVANADOS Y EL TANQUE.

Estas distancias mínimas no sólo están relacionadas a las tensiones de operación, también lo están a la distribución del campo eléctrico en lo puntos considerados. Con tal propósito, cualquier reducción por mejorar las distancias consideradas.

Con relación a la figura anterior y a título de orientación, se dan los siguientes valores de distancias mínimas en la tabla siguiente:

TENSION DE OPERACIÓN	3	5	10	20	30	40	50	60	70	100	
En aire a min. (mm)	35	50	-	-	-	-	-	-	-	-	
En aceite a min. (mm)	25	35	55	80	90	100	120	130	160		
B min. (mm)								120	130	160	200
	50	60	75	85	100	120	140	150	180		

Por razones prácticas, se recomienda no usar valores inferiores a los siguientes:

Para A: En aire 35 mm
 En aceite 20 mm

Para B:

Entre los devanados de columnas adyacentes se deben respetar también ciertos valores mínimos, indicados pro la distancia C en al figura anterior, esta distancia se puede obtener de la relación:

$$C = 0.8 \text{ Kv}$$

$$C = 0.9 \text{ Kv}$$

Cuando se usa diafragma aislante, esta distancia puede descender hasta 10 o 50 mm.

DIMENSIONAMIENTO De LOS TRANSFORMADORES TRIFASICOS EN AIRE

Estos transformadores son por lo general de pequeña potencia y no existe normalmente un criterio unificado en cuanto al diseño de las laminaciones, de manera que a título de orientación se pueden considerar los valores siguientes referidos a las figura indicada.

DIMENSIONAMIENTO LOS TRANSFORMADORES TRIFASICOS DE DISTRIBUCION ENFRIADOS POR ACEITE.

Dentro de esta categoría se pueden ubicar los transformadores que comprenden potencias que van desde algunas decenas hasta algunas centenas de kVA y con tensiones primarias hasta de 34.5 kV o valores alrededor de éste. Las tensiones secundarias normalizadas dependen de cierta medida de la aplicación específica y pueden ser por ejemplo 4 160 volts, 440 volts ó 220 volts entre fases, con una frecuencia normalizada que en el caso de México es de 650 Hz. Por éste y algunos otras problemas como son las pérdidas, el calentamiento que es común a todas las máquinas, adquiere importancia el problema del aislamiento.

Por lo general en los procedimientos de cálculo de los transformadores se hace uso de fórmulas y expresiones que algunas veces no tienen deducción matemática alguna, más bien son resultados del producto de la experiencia, del tipo de materiales usados y su calidad, etc.,

y que además. No son aplicables a todos los casos, por lo que no existe un procedimiento de cálculo único y general, esto hace necesario que el lector tenga un poco de cautela en cuanto a las metodologías del diseño de transformadores se refiere.

Datos de partida para el cálculo.

Los elementos de partida necesarios para la iniciación de un cálculo son: la potencia normal en kVA, las tensiones de vacío primaria y secundaria, los tapas para regulación de la tensión primaria, la conexión entre las fases.

PRINCIPALES CONEXIONES DE LOS TRANSFORMADORES

Introducción.

Dependiendo del propósito de la instalación, un transformador se puede conectar de distintas formas. En el caso de los transformadores monofásicos, hay distintas formas de conectarlos a la fuente de alimentación y a la carga. Dos o más transformadores se pueden conectar en distintas formas para cumplir con distintos requerimientos.

El concepto de polaridad.

A diferencia de la corriente directa, no hay polaridad positiva o negativa fija en la corriente alterna, de aquí que los transformadores no pueden tener polaridad fija en sus terminales.

La dirección relativa en la cual los devanados primarios y secundario de un transformador. Se devanan alrededor del núcleo, determina la dirección relativa del voltaje a través de los devanados. Por ejemplo, si en la figura siguiente, se supone que el voltaje aplicado en cualquier instante tiene dirección de A a B, al dirección del voltaje en el secundario será de C a D ó de D a C, dependiendo de la dirección relativa de los devanados.

Polaridad en un transformador monofásico.

- a) Polaridad aditiva.
- b) Polaridad sustractiva.

Dado que es importante, cuando dos o más transformadores se conectan juntos, conocer la dirección relativa del voltaje de cada transformador, se han establecido ciertas convenciones para designar la llamada POLARIDAD de un transformador. Esta designación de polaridad se puede obtener de la figura anterior.

Si una de las terminales del devanado de alto voltaje se conecta al lado adyacente opuesto del devanado de bajo voltaje (por ejemplo de A a C), el voltaje en las terminales restantes (B y D) es, o la suma o la diferencia de los voltajes primario y secundario, dependiendo de las direcciones relativas de los devanados. Si el voltaje de B a D es la suma, se dice que el transformador tiene polaridad ADITIVA y si es la diferencia, entonces se dice que tiene polaridad SUSTRATIVA.

Si los devanados de los lados de alto y bajo voltaje están en direcciones opuestas, los voltajes aplicado e inducido tendrán direcciones opuestas y se dice que el transformador tiene "polaridad sustractiva". Las terminales H1 y X1 estarán del lado izquierdo cuando se "ve" al transformador del lado de bajo voltaje hacia el lado de alto voltaje.

Si los devanados de los lados de alto y bajo voltaje están en la misma dirección, los voltajes aplicado e inducido tendrán la misma dirección y se dice entonces que el transformador tiene "polaridad aditiva", la terminal X1 se encontrará del lado derecho cuando se "ve" al transformador del lado de bajo voltaje hacia el lado de alto voltaje.

Cuando se desea conectar en paralelo los secundarios de dos (o más) transformadores, se conectan en forma similar, las terminales que tiene la misma marca de polaridad.

La prueba de polaridad.

Cuando en un transformador no está especificada la polaridad o se desconoce, se puede determinar por una simple medición de voltaje como se indica a continuación:

1. Hacer una conexión entre las terminales de alto voltaje y bajo voltaje del lado derecho cuando se ve al transformador desde el lado de las boquillas y de bajo voltaje.
2. Aplicar un voltaje bajo, por ejemplo 120 volts a las terminales de alto voltaje y medir este voltaje con un vóltmetro.
3. Medir el voltaje de la terminal del lado izquierdo del lado de alto voltaje al terminal del lado izquierdo de bajo voltaje.

Si el voltaje anterior es menor que el voltaje a través de las terminales de alto voltaje, el transformador tiene polaridad sustractiva. Si este voltaje es mayor, entonces la polaridad es aditiva.

Conexión de los transformadores monofásicos.

La conexión más simple de las conexiones de los transformadores es la conexión monofásica.

Un método sencillo de llevar las terminales de los devanados primarios y secundario a las boquillas que llevan al exterior del tanque del transformador dos indicó en la figura anterior. Para proporcionar flexibilidad en las conexiones, las bobinas de los devanados primario y secundario, se arreglan en dos secciones, cada sección de una bobina tiene el mismo número de espiras, por lo tanto, genera el mismo voltaje. Las dos primeras secciones se conectan por lo general juntas, dentro del tanque y únicamente dos son llevadas al exterior del tanque a través de las boquillas, las cuales las aíslan de la tapa.

Se pueden sacar cuatro conductores secundarios de cada bobina del secundario, con los dos conductores o terminales transpuestos del interior, antes de ser llevado al exterior. En transformadores nuevos del tipo distribución. Es práctica común estas dos terminales transpuestas, se conecta dentro del tanque y sólo un conductor común se lleva al exterior.

La boquilla secundaria centro se le denomina por lo general "Boquilla del neutro" y en muchos casos es una tuerca que conecta también a la pared del tanque proporcionando un medio de conexión a tierra al tanque del transformador.

Sistemas polifásicos.

Como se sabe, en corriente alterna hay dos tipos de circuitos: los denominados circuitos monofásicos y los circuitos polifásicos (los más comunes son los trifásicos). En los circuitos monofásicos sólo una fase o conjunto de voltajes de onda de forma senoidal se aplican a los circuitos y únicamente en una fase circula corriente senoidal.

En un sistema polifásico se aplican dos o más voltajes senoidales a las diferentes partes del circuito y circulan en las mismas artes las correspondientes corrientes senoidales.

Cada parte del sistema polifásico se conoce como "fase" y prácticamente se denominan FASE A, FASE B y Fase C y en la misma forma se designan los voltajes indicando "voltajes de la fase A", "voltaje de la fase B", etc., y las corrientes, corriente de la fase A, corriente de la fase B, etc.

Los voltajes aplicados a un sistema polifásico se obtienen de una fuente de suministro polifásica, también, de manera que cada fase está siempre separada, por ejemplo, en un sistema trifásico se tienen tres fases separadas. Los métodos más comunes de conectar los devanados de una máquina eléctrica trifásica son en delta y en estrella, como se muestra a continuación:

- a) Conexión delta.
- b) Conexión estrella.
- c) Vectores de voltaje.

Se puede observar que en tanto los voltajes en las terminales A, B y C, son los mismos para las conexiones delta y estrella.

Los voltajes a través de los devanados 1, 2 y 3 en los dos sistemas, no sólo son de diferente magnitud, también se observa que sus direcciones no coinciden. Este hecho es importante en la conexión de transformadores, ya que puede provocar dificultades en la conexión de transformadores cuando no se tiene cuidado en esto.

Conexión trifásica de transformadores.

La transformación trifásica se puede realizar por medio de tres transformadores monofásicos en conexión trifásica o por medio de transformadores trifásicos. Los métodos de conexión de los devanados par a la conexión trifásica son los mismos, ya sea que se usen tres devanados en un transformador trifásico, o bien tres transformadores monofásicos por separado, en conexión trifásica. Las conexiones trifásicas más comunes son las denominadas DELTA y ESTRELLA.

Conexión DELTA-DELTA.

Esta conexión se usa con frecuencia para alimentar cargas de alumbrado pequeñas y cargas trifásica simultáneamente. Para esto se puede localizar una derivación o Tap en el punto medio del devanado secundario de uno de los transformadores conectándose a tierra y se conecta también al neutro del secundario. De esta manera, las cargas monofásicas se conectan entre los conductores de fase y neutro, por lo tanto, el transformador con la derivación en el punto medio toma dos terceras partes de la carga monofásica y una tercera parte de la carga trifásica. Los otros dos transformadores cada uno toma un tercio de las cargas monofásicas y trifásica.

Para poder cargar al banco trifásico en forma balanceada, se deben cumplir con las siguientes condiciones:

1. todo los transformadores deben tener idéntica relación de transformación.
2. Todos los transformadores deben tener el mismo valor de impedancia.
3. Todos los transformadores deben conectar en el mismo tap o derivación.

Conexión delta abierta-delta abierta.

La conexión delta-delta representa en cierto modo la mas flexible de las conexiones trifásicas. Una de las ventajas de esta conexión, es que si uno de los transformadores se daña o se retira de servicio, los otros dos pueden continuar operando en la llamada conexión "delta-abierta" o "V". Con esta conexión se suministra aproximadamente el 58% de la potencia que entrega un banco en conexión delta-delta.

En la conexión delta abierta, las impedancias de los transformadores no necesitan ser iguales necesariamente, aunque esta situación es preferible cuando es necesario cerrar la delta con un tercer transformador.

La conexión delta abierta, se usa normalmente para condiciones de emergencia, cuando en una conexión delta-delta uno de los transformadores del banco se desconecta por alguna razón. En forma similar a la conexión delta-delta, del punto medio del secundario de uno de los transformadores se puede tomar una derivación para alimentar pequeñas cargas de alumbrado o bien otros tipos de cargas.

Conexión estrella-delta.

Esta conexión se usa con frecuencia para alimentar cargas trifásicas grandes de un sistema trifásico de alimentación conectado en estrella. Tiene la limitante de que para alimentar cargas monofásicas y trifásicas en forma simultánea, no dispone del neutro.

Por otra parte, tiene la ventaja relativa de que la impedancia de los tres transformadores no necesita ser la misma en esta conexión.

Las relaciones entre corrientes y voltajes de fase de línea a línea para la conexión estrella delta, son las mismas que se tienen en la conexión delta-estrella estudiada en el párrafo anterior.

Conexión estrella-estrella.

Esta conexión se usa cuando se requiere alimentar grandes cargas monofásicas en forma simultánea, con cargas trifásicas. También se usa sólo si el neutro del primario se puede conectar sólidamente al neutro de la fuente de alimentación ya sea con un neutro común o a través de tierra. Cuando los neutros de ambos lados del banco de transformadores no se unen, el voltaje de línea a neutro tiende a distorsionarse (no es senoidal). La conexión estrella-estrella, se puede usar también sin unir los neutros, a condición de que cada transformador tenga un tercer devanado que se conoce como "devanado terciario". Este devanado terciario está siempre conectado en delta.

Con frecuencia, el devanado terciario se usa para alimentar los servicios de la Subestación.

Transformadores de una sola boquilla.

En la conexión estrella-estrella, los transformadores que tienen sólo la boquilla de tal tensión o primaria, esta boquilla se conecta a la línea de alimentación. La conexión especial en el parte externa del tanque del transformador, toma el lugar de la segunda boquilla de alta tensión y se debe conectar entre los tres transformadores y al hilo de neutro o tierra.

Los transformadores de distribución tienen una conexión instalada entre la boquilla de bajo voltaje del neutro y el tanque.

Transformadores trifásicos.

En términos generales, un banco formado por tres transformadores monofásicos, se puede reemplazar por un transformador trifásico. Estos transformadores trifásicos, como se ha descrito en capítulos anteriores, tienen un núcleo magnético con tres piernas, en donde se alojan los devanados primario y secundario de cada una de las fases. Los devanados se conectan internamente, en forma similar a los bancos de transformadores monofásicos, en cualquiera de las conexiones trifásicas, en cualquiera de las conexiones trifásicas, es decir, estrella-delta, delta abierta, etc.

Para una capacidad dada, un transformador trifásico es siempre de menor tamaño y más barato que un banco formado por tres transformadores monofásicos con la misma capacidad. En algunas ocasiones, aun con lo mencionado antes, se prefiere el uso de bancos de transformadores monofásicos, especialmente cuando por mantenimiento y confiabilidad resulta importante la facilidad para reemplazar a una de las unidades.

Conexión de transformadores en paralelo.

Los transformadores se pueden conectar en paralelo por distintas razones, las principales están relacionadas con problemas de confiabilidad y de incremento en la demanda. Cuando se excede o se está a punto de exceder la capacidad de un transformador ya en operación.

Para conectar los transformadores en paralelo y garantizar su correcta operación, se deben cumplir ciertas condiciones como son:

- a) Deben tener los mismos voltajes primarios y secundarios.
- b) Deben tener el mismo valor de impedancia expresado en porcentaje o en por unidad.
- c) Se debe verificar que la polaridad de los transformadores sea la misma.

PRUEBAS A TRANSFORMADORES.

Introducción.

Las pruebas se hacen en los transformadores y sus accesorios por distintas razones, durante su fabricación, para verificar la condición de sus componentes, durante la entrega, durante su operación como parte del mantenimiento, después de su reparación, etc.

Algunas de las pruebas que se hacen en los transformadores se consideran como básicas y algunas otras varían de acuerdo a la condición individual de los transformadores y pueden cambiar de acuerdo al tipo de transformador, por lo que existen distintas formas de clasificación de las pruebas a transformadores, por ejemplo algunos las clasifican en prueba de baja tensión y prueba de alta tensión. También se pueden agrupar como pruebas preliminares, intermedias y de verificación (Finales).

Las pruebas preliminares se realizan cuando un transformador se ha puesto fuera de servicio para mantenimiento programado o para revisión programada o bien ha tenido alguna falla. Las pruebas se realizan antes de "abrir" el transformador y tienen el propósito general de encontrar el tipo y naturaleza de la falla. Las llamadas pruebas preliminares incluyen:

1. Prueba al aceite del transformador.
2. Medición de la resistencia de aislamiento de los devanados.
3. Medición de la resistencia ohmica de los devanados.
4. Determinación de las características del aislamiento.

Las llamadas pruebas intermedias, como su nombre lo indican se realizan durante el transcurso de una reparación o bien en las etapas intermedias de la fabricación, cuando el transformador está en proceso de armado o bien desarmado (según sea el caso) y el tipo de pruebas depende del propósito de la reparación o la etapa de fabricación, por lo general se hacen cuando las bobinas no han sido montadas o desmontadas (según sea el caso) y son principalmente las siguientes:

1. Medición de la resistencia de aislamiento de tornillos y herrajes contra el núcleo.
2. Prueba de la resistencia de aislamiento de tornillos y herrajes por voltaje aplicado.
3. Prueba de las boquillas por medio de voltajes aplicado.

Cuando se han desmontado las bobinas durante un trabajo de reparación, entonces las pruebas se incrementan.

Las pruebas finales se hacen sobre transformadores terminados de fabricación o armados totalmente después de una reparación e incluyen las siguientes:

1. Prueba al aceite del transformador.
2. Medición de la resistencia de aislamiento.
3. Prueba de relación de transformación.
4. Determinación del desplazamiento de fase de los grupos de bobinas.
5. Determinación de las características del aislamiento.
6. Prueba del aislamiento por voltaje aplicado.
7. Prueba para la determinación de las pérdidas en vacío y en corto circuito (determinación de impedancia).
8. Prueba del aislamiento entre espiras por voltaje inducido.
9. Medición de la corriente de vacío y la corriente de excitación.

El orden de las pruebas no es necesariamente el mencionado anteriormente, y de hecho existen normas nacionales e internacionales que recomiendan que pruebas y en que orden se deben realizar, así como cuando se deben efectuar.

Pruebas al aceite del transformador.

El aceite de los transformadores se somete por lo general a pruebas de rigidez dieléctrica, prueba de pérdidas dieléctricas y eventualmente análisis químico.

Cuando se trata de pruebas de campo, la condición del aceite se puede determinar por dos pruebas relativamente simples. Una que comprueba el color de una muestra de aceite del transformador bajo prueba, con un conjunto o panel de colores de referencia que dan un indicación de la emulsificación que puede tener lugar. El recipiente en que se toma la muestra

debe enjuagar primero con el propio aceite de la muestra ya debe ser tomado de la parte inferior del transformador de la válvula de drenaje.

Cuando se usa un probador de color, al muestra de aceite se debe colocar en tubo de vidrio transparente que se introduce en una parte del probador diseñada para tal fin. Se tiene un pequeño disco que gira y que tiene distintos colores de referencia, cuando el color del disco es similar al de la muestra, aparece la designación numérica del color de la muestra de aceite. De hecho esta prueba sirve para verificar el grado de oxidación del aceite y debe marcar 0.5 para aceites nuevos y 5 máximo para aceites usados.

En el rango de color amarillo, naranja y rojo indican que el transformador puede tener daños severos.

Prueba de rigidez dieléctrica del aceite.

Esta prueba se hace en un probador especial denominado "probador de rigidez dieléctrica del aceite". En este caso, la muestra de aceite también se toma de la parte inferior del transformador, por medio de la llamada válvula de drenaje y se vacía en un recipiente denominado "copa estándar" que puede ser de porcelana o de vidrio y que tiene una capacidad del orden de 1/2 litro. En ocasiones el aceite se toma en un recipiente de vidrio y después se vacía a la copa estándar que tiene dos electrodos que pueden ser planos o esféricos y cuyo diámetro y separación está normalizado de acuerdo al tipo de prueba. El voltaje aplicado entre electrodos se hace por medio de un transformador regulador integrado al propio aparato probador. Después de llenada la copa estándar se debe esperar alrededor de 20 minutos para permitir que se eliminen las burbujas de aire del aceite antes de aplicar el voltaje; el voltaje se aplica energizando el aparato por medio de un switch que previamente se ha conectado ya un contacto o fuente de alimentación común y corriente. El voltaje se eleva gradualmente por medio de la perilla o manija del regulador de voltaje, la tensión o voltaje de ruptura se mide por medio de un voltmetro graduado en kilovolts.

Existen de acuerdo distintos criterios de prueba, pero en general se puede afirmar que se pueden aplicar seis rupturas dieléctricas con intervalos de 10 minutos., la primera no se toma en cuenta, y el promedio de las otras cinco se toma como la tensión de ruptura o rigidez dieléctrica. Normalmente la rigidez dieléctrica en los aceites aislantes se debe comportar en la forma siguiente:

Aceites degradados y contaminados	De 10 a 28 kV
Aceites carbonizados no degradados	De 28 a 33 kV
Aceites Nuevo sin desgasificar	De 33 a 44 kV
Aceite Nuevo desgasificado	De 40 a 50 kV
Aceite regenerado	De 50 a 60 kV

Prueba de resistencia de aislamiento.

La prueba de resistencia de aislamiento en transformadores sirve no solo para verificar la calidad del aislamiento en transformadores, también permite verificar el grado de humedad y en ocasiones defectos severos en el aislamiento.

La resistencia de aislamiento se mide por medio de un aparato conocido como "MEGGER". El megger consiste de una fuente de alimentación en corriente directa y un sistema de medición. La fuente es un pequeño generador que se puede accionar en forma manual o eléctricamente. El voltaje en terminales de un megger varía de acuerdo al fabricante y a si se trata de accionamiento manual o eléctrico, pero en general se pueden encontrar en forma comercial megger de 250 volts, 1000 volts y 2500 volts. La escala del instrumento está graduada para leer resistencias de aislamiento en el rango de 0 a 10,000 megohms.

La resistencia de aislamiento de un transformador se mide entre los devanados conectados todos entre sí, contra el tanque conectado a tierra y entre cada devanado y el tanque, con el resto de los devanados conectados a tierra.

Para un transformador de dos devanados se deben tomar las siguientes medidas:

- Entre el devanado de alto voltaje y el tanque con el devanado de bajo voltaje conectado a tierra.
- Entre los devanados de alto voltaje y bajo voltaje conectado entre sí, contra el tanque.

Estas mediciones se pueden expresar en forma sintetizada como:

Alto Voltaje Vs. Tanque + bajo voltaje a tierra.

Bajo voltaje Vs. Tanque + alto voltaje a tierra.

Alto voltaje + bajo voltaje Vs. Tanque a tierra.

Cuando se trata de transformadores con tres devanados las mediciones que se deben efectuar son las siguientes:

- Alto voltaje (primario) Vs. Tanque con los devanados de bajo voltaje (secundario) y medio voltaje (terciario) a tierra.
- Medio voltaje (terciario) Vs. Tanque con los devanados de alto voltaje y bajo voltaje a tierra.
- Bajo voltaje (secundario) Vs. Tanque, con los devanados de alto voltaje y medio voltaje a tierra.
- Alto voltaje y medio voltaje juntos Vs. Tanque, con el devanado de bajo voltaje a tierra.
- Alto voltaje + medio voltaje + bajo voltaje Vs. Tanque.

BIBLIOGRAFIA

Máquinas Eléctricas y transformadores.

Edwin Kosow

El ABC de las Máquinas Eléctricas

Enríquez Harper