

III. EL TRANSFORMADOR TRIFÁSICO.

III.1. CONCEPTOS PREVIOS SOBRE CIRCUITOS TRIFÁSICOS SINUSOIDALES.

Se supone que el estudiante domina el análisis y resolución del comportamiento de los circuitos trifásicos alimentados por fuentes sinusoidales perfectas en régimen permanentes a partir del curso de Sistemas Lineales.¹

Repasemos algunas conclusiones fundamentales de la teoría estudiada y confirmemos algunas definiciones.²

- En los circuitos trifásicos se parte que las fuentes de tensión o de corriente constituyen siempre **SISTEMAS SINUSOIDALES PERFECTOS** esto es **DIRECTOS Y EQUILIBRADOS**, representados por tres fasores (1,2,3 o r,s,t o u,v,w o x,y,z) de **IGUAL MÓDULO Y DESFAZADOS 120 GRADOS GIRANDO EN SENTIDO ANTIHORARIO** a una velocidad $2\pi f$.
- La conexión entre un borne de una fuente trifásica y el correspondiente borne de una carga trifásica cualquiera se le llama **LINEA**.
- La tensión entre dos bornes de un sistema trifásico (1-2; 2-3; 3-1) se le llama **TENSIÓN DE LÍNEA** y la vamos a representar por la letra **U** y tal que U_{ij} es la tensión entre i y j .
- La tensión entre un borne y el neutro (real o virtual) de un sistema trifásico se la llama **TENSIÓN DE FASE** y la vamos a representar con la letra **V** y tal que V_i es la tensión entre el borne i y el neutro del sistema.

- Luego se tendrá
$$\dot{U}_{ij} = \dot{V}_i - \dot{V}_j$$

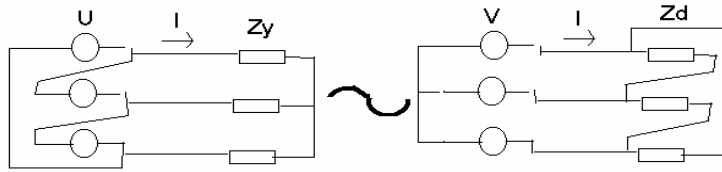
- **EQUIVALENCIA:** Siempre se cumple que dado un circuito trifásico configurado en triángulo siempre existe un circuito trifásico en estrella equivalente y recíprocamente.
Si las cargas constituyen un sistema equilibrado entonces se cumple que: $Z_\Delta = 3 \cdot Z_Y$
Si las tensiones constituyen un sistema perfecto entonces se cumple que $U = \sqrt{3} \cdot V$
Si las corrientes constituyen un sistema perfecto entonces se cumple que $I_Y = I_{Línea} = \sqrt{3} \cdot I_\Delta$

Un sistema trifásico perfecto de tensiones aplicado sobre una carga trifásica equilibrada da lugar a un sistema trifásico perfecto de corrientes.

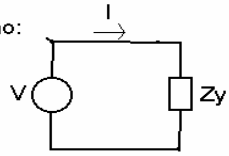
- **RESOLUCIÓN MONOFÁSICA EN SISTEMAS PERFECTOS Y EQUILIBRADOS:** Un sistema de cargas trifásicas idénticas constituye un sistema de cargas trifásicas equilibradas y si es alimentada por una fuente trifásica perfecta el análisis del circuito trifásico se reduce al análisis de un circuito monofásico constituido por una de las fases del circuito trifásico configurado este en su versión estrella equivalente.

¹ Si este no es el caso repase en forma urgente.

² Lo que sigue resulta **FUNDAMENTAL** a fin de la resolución de los casos con transformadores trifásicos.



Se resuelve como:



Con: $U = \sqrt{3}V$; $Z_d = 3 Z_y$

III.2. TRANSFORMADORES TRIFÁSICOS.

La potencia eléctrica comercial es prácticamente generada, transmitida y distribuida en circuitos configurados en forma trifásica a partir de circuitos perfectos y equilibrados. Las cargas (consumos) se aplican de tal manera que constituyan, sea en forma monofásica o trifásica, sistemas equilibrados de cargas trifásicas.

Como hemos mencionado los transformadores tienen su principal aplicación a fin de convertir un voltaje a otro. En los circuitos trifásicos esta conversión se realiza utilizando los transformadores trifásicos.

III. 2.1 EL BANCO TRIFÁSICO

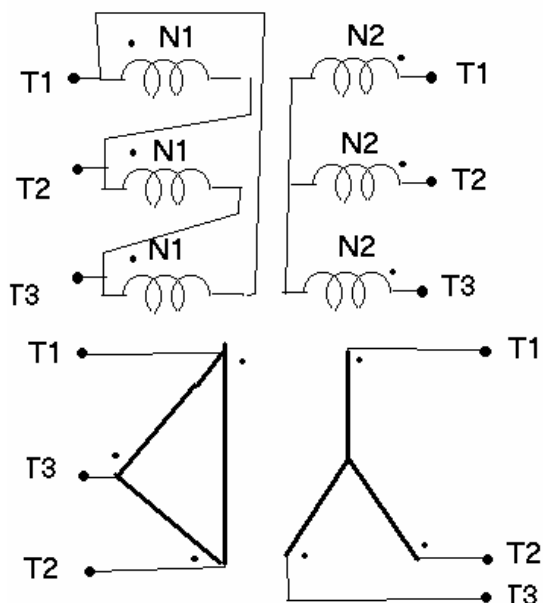
En principio un transformador trifásico se puede configurar utilizando **tres transformadores monofásicos IDÉNTICOS conectando sus bobinados primarios por un lado y secundarios por el otro convenientemente, a esta forma de configurar un transformador trifásico a partir de 3 monofásico se le denomina “Banco trifásico”**

En general se usan mayoritariamente dos tipos de conexiones para los bobinados:

La conexión TRIÁNGULO o Δ o D

La conexión ESTRELLA o Y

En el dibujo se muestra configurado un transformador trifásico en el que su primario está en TRIÁNGULO mientras que su secundario está en ESTRELLA.



En el supuesto que los transformadores monofásicos fueran ideales resulta imprescindible en este punto resolver el siguiente ejercicio:³

- Si aplico un sistema trifásico perfecto de tensiones de línea U del lado primario, indicar que sistemas trifásico de tensiones tanto de fase como de línea tengo del lado secundario indicando sus valores en función de U y de la relación de vueltas de cada transformador.
- Si cargo el lado secundario con una carga trifásica equilibrada Z (en triángulo o estrella) indicar cual es la impedancia vista por la fuente trifásica del lado primario en función del valor de Z y de la relación de vueltas de cada transformador.
- Calcular en este caso el sistema trifásico de corrientes expresando el resultado en función de U , n y Z .

Sol: Si U es el módulo de la tensión de línea de la fuente primaria, hacemos $n = N1/N2$ y cargamos con una impedancia trifásica Z supuesta en estrella se tiene:

- Sistema perfecto de tensiones de fase del lado secundario: $V = U/n$ y sistema perfecto de tensiones de

$$\text{línea } U_s = \sqrt{3} \frac{U}{n} \text{ adelantado } 30^\circ \text{ respecto al sistema primario.}$$

³ Será resuelto en clase. Si no asiste a las mismas se sugiere resolver detalladamente este ejercicio y luego continuar.

- b) Carga equilibrada de valor n^2Z dispuesta en triángulo o $n^2Z/3$ dispuesta en estrella.
- c) A cargo del lector.

En consecuencia las posibilidades de combinar la conexión de los bobinados da lugar a cuatro GRUPOS DE CONEXIÓN de los transformadores trifásicos a saber:⁴

ESTRELLA / TRIÁNGULO Y / Δ
 ESTRELLA / ESTRELLA Y / Y
 TRIÁNGULO / ESTRELLA Δ / Y
 TRIÁNGULO / TRIÁNGULO Δ / Δ

Como ejercicios resulta muy conveniente resolver el ejercicio anterior para cada una de estas configuraciones.

Obsérvese que con a partir de tres transformadores monofásicos se puede obtener cualquiera de las configuraciones anteriores de transformador trifásico.

III.2.2 EL TRANSFORMADOR TRIFÁSICO.

Consideremos un transformador monofásico como el indicado en la figura a). Sabemos que el flujo ϕ_i está en fase con la corriente con la corriente por los bobinados.

Supongamos ahora que tomo tres transformadores monofásicos y los arreglo dentro de un único circuito magnético como esquematiza la figura b) donde comparten una de las columnas a todo lo demás idéntico.

Si por los bobinados circula un sistema trifásico de corrientes perfecto cuanto vale el flujo por el tramo indicado en la figura b)?

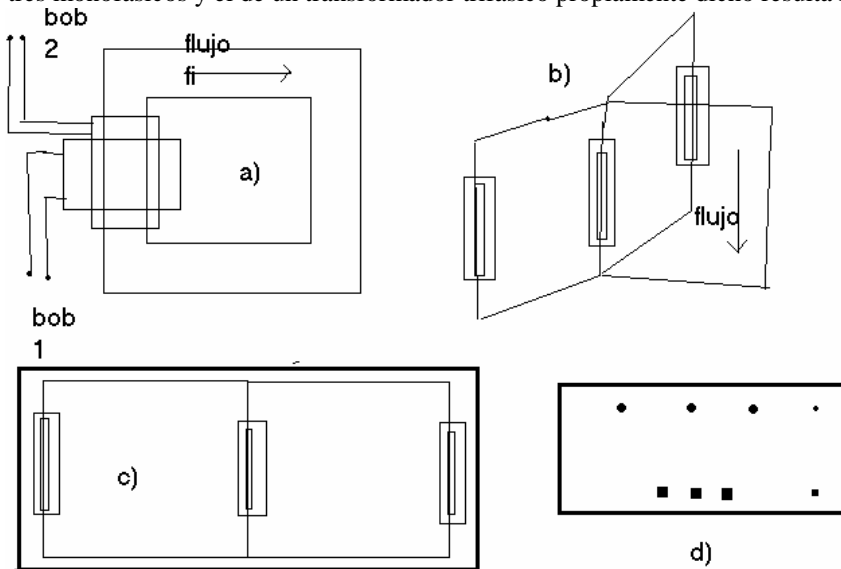
Cero, pues como los flujos están en fase con las corrientes entonces también configuran un sistema perfecto de flujos por lo que su suma es nula.

Pero entonces puedo prescindir de todo ese tramo y la operación en régimen equilibrado sería idéntica a la de tres transformadores monofásicos independientes.

Por tanto puedo “armar” un transformador trifásico compartiendo los bobinados un mismo circuito magnético como indica la figura c) formando un único equipo dentro de un recipiente. Puedo realizar las conexiones en el interior del mismo según configure los bobinados estrella o triángulo y “salir” del recipiente con los tres terminales de cada uno de los lados (eventualmente el neutro para las configuraciones estrella), eventualmente aunque muy rara vez se sale con los 12 bornes accesibles.

De esta manera se realizan los transformadores trifásicos propiamente dichos en un único equipo.

Obsérvese que en régimen permanente equilibrado y perfecto el estudio de un transformador trifásico compuesto por tres monofásicos y el de un transformador trifásico propiamente dicho resulta IDÉNTICO.



⁴ Estas configuraciones son las utilizadas en la práctica en la generalidad de los casos, existen sin embargo otras configuraciones especiales que escapan a los objetivos de este curso.

III.3 ANÁLISIS DEL DESEMPEÑO DE LOS TRANSFORMADORES TRIFÁSICOS

III.3.1 RELACIÓN DE TRANSFORMACIÓN. (r)

Se define la relación de transformación como el cociente entre *el módulo de la tensión de línea del lado primario U_p y el módulo de la tensión de línea del lado secundario U_s* .

Luego, por definición:

$$r = \frac{U_p}{U_s}$$

Obsérvese que en el caso monofásico la relación de transformación coincidía con la relación de vueltas del transformador.

Sin embargo en los transformadores trifásicos la relación de transformación no coincide en algunos grupos de conexión con la relación de vueltas de cada uno de los transformadores de fase.

En efecto si evaluamos todos los casos posibles se tiene:

$$\text{ESTRELLA / ESTRELLA} \quad \frac{U_p / \sqrt{3}}{N_1} = \frac{U_s / \sqrt{3}}{N_2} \Rightarrow \frac{U_p}{U_s} = \frac{N_1}{N_2} \Rightarrow r = n$$

$$\text{TRIÁNGULO / TRIÁNGULO} \quad \frac{U_p}{N_1} = \frac{U_s}{N_2} \Rightarrow \frac{U_p}{U_s} = \frac{N_1}{N_2} \Rightarrow r = n$$

$$\text{TRIÁNGULO/ESTRELLA} \quad \frac{U_p}{N_1} = \frac{U_s / \sqrt{3}}{N_2} \Rightarrow \frac{U_p}{U_s} = \frac{1}{\sqrt{3}} \frac{N_1}{N_2} \Rightarrow r = \frac{n}{\sqrt{3}}$$

$$\text{ESTRELLA / TRIÁNGULO} \quad \frac{U_p / \sqrt{3}}{N_1} = \frac{U_s}{N_2} \Rightarrow \frac{U_p}{U_s} = \sqrt{3} \frac{N_1}{N_2} \Rightarrow r = \sqrt{3}n$$

III.3.2 CIRCUITO EQUIVALENTE MONOFÁSICO DE UN TRANSFORMADOR TRIFÁSICO

El análisis que desarrollaremos se aplica cuando al lado primario del transformador se alimenta con una fuente trifásica perfecta de tensiones, mientras que al lado secundario se le carga con una carga equilibrada.

En estas condiciones el circuito trifásico que resulta es perfectamente equilibrado.

Por tanto por lo que sabemos de la teoría de circuitos, estudiar un circuito trifásico equilibrado se puede resumir a estudiar un circuito monofásico compuesto por una de las fases del circuito trifásico, esto es entre línea y neutro o lo que se denomina el equivalente monofásico estrella.

III.3.2.1 CASO IDEAL.

Consideremos un transformador trifásico ideal cuya configuración sea Y/Y

Consideremos el circuito típico de la figura.

El mismo resulta con todos sus componentes equilibrados por tanto dará lugar a un sistema trifásico de corrientes equilibradas y sus neutros será indiferente que estén o no unidos puesto que la corriente por los mismos será siempre nula.

Por tanto supongamos que sus neutros están unidos.

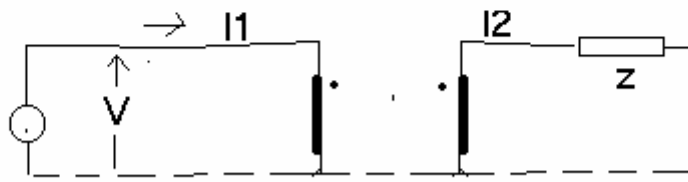
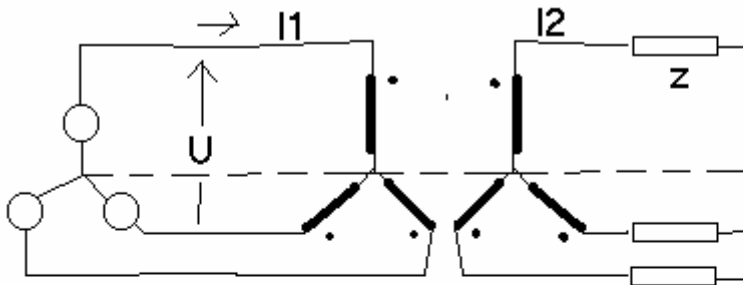
En este caso resulta obvio que resolver el circuito trifásico equivale a resolver el circuito monofásico resultante,

compuesto por una fase de la fuente de valor $V = \frac{U}{\sqrt{3}}$, un transformador monofásico cuya relación de

vueltas es igual a la relación de transformación, cargado con la impedancia Z (si la misma hubiese sido configurada en triángulo sería su equivalente estrella Z/3)

Que acontece si uno de los lados hubiese estado configurado en triángulo?

Utilizo el equivalente estrella del triángulo tal que se mantenga la relación de transformación, por lo cual la fase del estrella equivalente tendrá su número de vueltas dividido entre $\sqrt{3}$

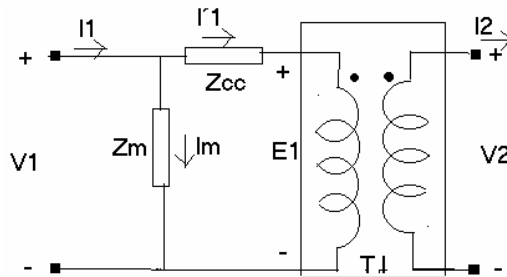


En consecuencia para resolver un circuito trifásico equilibrado que contiene transformadores trifásicos ideales alcanza con resolver el circuito monofásico estrella equivalente.

III.3.2.1 CASO REAL.

Consideremos ahora un transformador trifásico real. Lo podemos concebir siempre como compuesto por tres transformadores monofásicos.

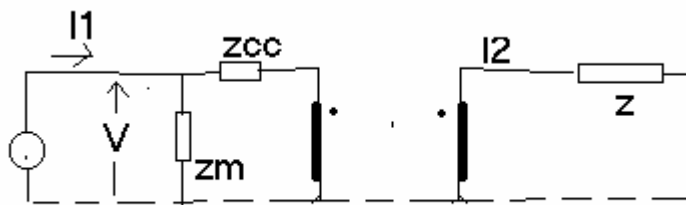
Por tanto cada fase tendrá como circuito equivalente el indicado por la figura:



Supongamos un transformador trifásico estrella/estrella.

Como resulta el circuito del transformador trifásico?

Como los tres transformadores son idénticos las impedancia de vacío y de cortocircuito de cada fase también lo serán, resultando las impedancias de vacío en una carga en estrella y la de cortocircuito en serie con cada fase, el circuito trifásico resulta equilibrado, por lo que sus neutros estarán al mismo potencial por tanto puedo repetir el razonamiento anterior resultando el circuito equivalente monofásico en estrella indicado en la figura



Como resulta el equivalente estrella de una configuración triángulo?

En lo que respecta a las impedancias las mismas están en triángulo por lo que puedo utilizar su equivalente estrella dividiendo su valor entre tres., mientras que al bobinado del transformador encuentro su equivalente al igual que en el caso ideal dividiendo por $\sqrt{3}$

En la práctica de resolución de circuitos con transformadores siempre se asume que el transformador es el equivalente estrella/estrella a fin de estudiar el mismo como un circuito monofásico sin alterar el valor de las impedancias de cortocircuito, de vacío, ni la relación de vueltas de cada fase. Luego de resuelto el problema y en el caso que se quiera saber que corrientes reales están pasando por cada bobinado se hacen las correcciones que correspondan. Análogamente en aquellos casos que el dato de las impedancias sean dados con el bobinado configurado en la realidad en triángulo, se convierten las mismas a su estrella equivalente, resolviéndose el problema siempre en la configuración estrella equivalente.

III.3.3 VALORES NOMINALES DE UN TRANSFORMADOR TRIFÁSICO.

Las definiciones son conceptualmente las mismas que para el caso monofásico, sin embargo se debe tener en cuenta que en este caso las tensiones nominales de primario o secundario no tienen por que ser las mismas que las tensiones nominales de los bobinados que conforman cada fase. En efecto para un bobinado conectado en estrella la tensión nominal de cada bobinado de fase puede ser $\sqrt{3}$ veces menos que la tensión nominal de línea del transformador.

TENSIÓN NOMINAL PRIMARIA (SECUNDARIA) U: es el módulo del voltaje *de línea* asignado al lado primario (secundario) del transformador.

CLASE DE TENSIÓN PRIMARIA (SECUNDARIA) : es el mayor valor del voltaje de línea que puede ser aplicado permanentemente al lado primario (secundario) del transformador.

RELACIÓN DE TRANSFORMACIÓN NOMINAL: Es el cociente entre los módulos de la tensión nominal primaria y secundaria.

POTENCIA NOMINAL: S_n Es la potencia aparente en VA que determina la corriente nominal que puede ser tomada por el transformador con el voltaje nominal aplicado a sus lados primarios y secundarios. $S_n = \sqrt{3} U_n I_n$

CORRIENTE NOMINAL (I_n) Es la corriente por los terminales del transformador correspondiente de dividir la potencia nominal entre el voltaje de línea nominal y raíz de tres. $I_n = S_n / \sqrt{3} U_n$

III.3.3 DETERMINACIÓN DE LOS DATOS PARA EL CIRCUITO EQUIVALENTE EN LA REALIDAD.-

III.3.3.1 DATOS DE “CHAPA”.

En los transformadores de potencia, por norma, en cada equipo necesariamente se adosa una chapa exterior indeleble la cual contiene los principales datos del transformador.

Siempre se encuentran en la misma, dentro de otros datos nominales que luego veremos, la relación de transformación y la impedancia de cortocircuito estrella equivalente.

La impedancia de vacío en general no está en la chapa sino que se encuentra en el catálogo del fabricante.

III.3.3.2 DETERMINACIÓN DE LOS DATOS BÁSICOS POR ENSAYOS.

Los ensayos son los procedimientos usuales cuando se quiere determinar los parámetros del circuito equivalente de un transformador-

En general los parámetros del circuito equivalente que interesan son los del transformador equivalente Y/Y cualquiera sea su grupo de conexión. Luego de obtenidos los parámetros del equivalente se pueden obtener sin mayor dificultad los parámetros del circuito de cada una de las fases del transformador utilizando las equivalencias usuales de circuitos equilibrados de tres bornes.

a. Ensayo de la relación de transformación.

Este ensayo está destinado a determinar la relación de tensiones nominales entre primario y secundario. El ensayo se realiza conectando una fuente de tensión trifásica a uno de los lados dejando en vacío el otro y simplemente midiendo la tensión de ambos lados. El valor de la tensión de ensayo deberá ser igual o menor que el valor nominal. Conocida la relación de transformación y el grupo de conexión se puede luego determinar la relación de vueltas de los bobinados.

b. Ensayo de vacío para determinar la impedancia magnetizante y de pérdidas en el hierro.

Al igual que en el caso monofásico este ensayo está destinado a determinar el valor de la impedancia de vacío Z_0 . El procedimiento es conceptualmente idéntico al caso monofásico determinándose el valor de la Z_0 en su versión serie para la versión estrella equivalente del transformador a partir de las medidas de tensión, corriente y potencia.

$$Z_0 = \frac{U}{\sqrt{3} \cdot I} \langle \text{Arc. cos} \frac{W}{\sqrt{3} \cdot U \cdot I} \rangle$$

.Por las mismas consideraciones realizadas en el caso monofásico la tensión de ensayo debe ser lo mas cercana posible a la nominal.

c. Ensayo de cortocircuito para determinar la impedancia de cortocircuito.

También es conceptualmente idéntico al caso monofásico y se utiliza para determinar la impedancia de cortocircuito del transformador en su versión estrella equivalente, determinándose el valor de Z_{cc} a partir de las medidas de tensión corriente y potencia. Vale la misma consideración realizada respecto a la relación de módulos entre la Z_{cc} y la Z_0 por lo que para este ensayo también la Z_0 no es considerada. Por las mismas consideraciones realizadas en el caso monofásico la tensión de ensayo debe ser reducida y su valor se elige de tal manera que la corriente de ensayo sea lo mas cercana a su valor nominal.

$$Z_{cc} = \frac{U}{\sqrt{3} \cdot I_N} \langle \text{Arc. cos} \frac{W}{\sqrt{3} \cdot U \cdot I} \rangle$$

En este punto surge además una forma usual de expresar el dato de la impedancia de c.c de un transformador como veremos a continuación:

Llamemos a la tensión de este ensayo expresada en porcentaje de la tensión nominal como **Tensión de cortocircuito (ucc en %)** $u_{cc} = \frac{U}{U_N} = \frac{V}{V_N}$.

Este valor porcentual se puede leer como aquel porcentaje de la tensión nominal a aplicar en un lado del transformador que hace que estando uno de los lados en cortocircuito circula la corriente nominal.

Llamemos ahora a la relación entre la tensión nominal de fase y la corriente nominal de un lado cualquiera del transformador como **IMPEDANCIA BASE** del lado que corresponda. Tendremos entonces

que $Z_{B1} = \frac{V_{N1}}{I_{N1}}$ será la impedancia base del lado primario del transformador.

Supongamos que el ensayo de c.c lo hacemos sobre el lado primario, tendremos entonces que el módulo de la impedancia de c.c será $Z_{cc} = \frac{V}{I_{N1}}$ por lo que podemos escribir que

$$Z_{cc1} = u_{cc} * \frac{V_{N1}}{I_{N1}} = u_{cc} * Z_{B1} \quad \text{con lo que si definimos ahora } z_{cc1} = \frac{Z_{cc1}}{Z_{B1}} \quad \text{resulta que}$$

$$z_{cc1} = u_{cc}, \text{ como resulta fácil probar } z_{cc1} = z_{cc2} = z_{cc} \quad \text{resulta finalmente que: } \boxed{z_{CC} = u_{CC}}$$

La impedancia de c.c de un transformador en términos de la impedancia base es **IDÉNTICA** a la tensión porcentual del ensayo de c.c.

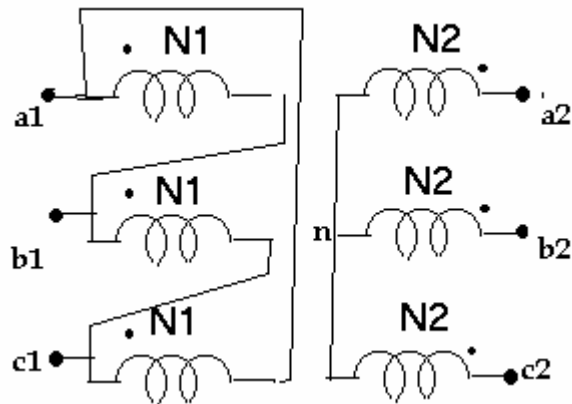
Lo práctico de esta relación es que los transformadores comerciales presentan un estrecho rango de valores para la tensión porcentual de ensayo de c.c , en efecto, transformadores “chicos” (1 MVA o menos) tienen valores en el entorno del 5% mientras que transformadores “grandes” (100 MVA o más) tienen valores no superiores al 12 %, por tanto es sencillo estimar el valor del módulo de las impedancias de c.c de los transformadores en caso de no conocerse su valor. Por otra parte los datos de los fabricantes en general se dan en términos porcentuales asumiéndose además (a falta de mayores datos) que la impedancia de c.c es reactiva pura.

En consecuencia cuando se lea que un transformador presenta una impedancia de c.c del 10% sin más datos, se tendrá una impedancia de c.c reactiva pura cuyo valor en Ohm será el producto de 0,1 por el valor de la impedancia base de cualquiera de sus bobinados.

III.3.4 DESFAZAJE ENTRE LAS TENSIONES PRIMARIAS Y SECUNDARIAS. EL ÍNDICE HORARIO DEL TRANSFORMADOR.

Una característica muy importante que aparece en los transformadores trifásicos es el desfazaje que resulta entre las tensiones de línea (o de fase) del primario con el secundario del transformador.

Supongamos un transformador cuyo grupo de conexión es ΔY con los “puntos” de cada fase como el indicado en el dibujo

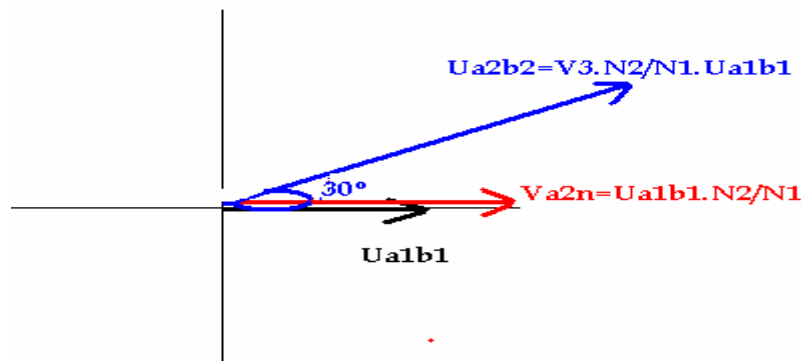


Impongamos una fuente perfecta trifásica en el primario dada por los fasores $(U_{a1b1}, U_{b1c1}, U_{c1a1})$. Sabemos que en el secundario aparecerá un sistemas de tensiones perfectos de fasores $(U_{a2b2}, U_{b2c2}, U_{c2a2})$

Que relación hay entre las tensiones de línea (U_{ij1}) (bornes i y j) del primario y las tensiones de línea (U_{ij2}) (de los mismos bornes i y j) del secundario tanto en módulo como en fase?

A fin de responder a esta pregunta realicemos el procedimiento usual y determinemos la relación entre una de las fases, luego las otras estarán a 120° manteniendo la misma relación.

Tomemos U_{ab1} , se inducirá entonces una tensión de fase en el secundario de módulo $V_{a2n} = U_{ab1} \cdot N2/N1$ y tal que el fasor V_{a2n} es colineal a U_{ab1} dado lo indicado por la ubicación de los “puntos”. Pero sabemos por la composición de los sistemas trifásicos que las tensiones de línea “adelantan” 30° a las tensiones de fase por tanto y que por otra parte la relación de módulos es $\sqrt{3}$ por tanto se tendrá:



Por lo tanto para el transformador del ejemplo la relación entre los módulos es la ya conocida pero se agrega que *la tensión de línea secundaria “adelanta” su correspondiente tensión de línea primaria en 30°*

Pero:

Este resultado de desfazaje entre tensiones de línea (o de fase) correspondientes cambia ya sea por que nombre diferente los bornes primarios o secundarios, o por que cambie el grupo de conexión o por que cambie la ubicación de los puntos.

Luego:

EL DESFAZAJE ENTRE LAS TENSIONES DE LÍNEA (O DE FASE) CORRESPONDIENTES ENTRE PRIMARIO Y SECUNDARIO DE UN TRANSFORMADOR TRIFÁSICO DEPENDE DE CÓMO CONFIGURE EL TRANSFORMADOR Y DE CÓMO NOMBRE LOS RESPECTIVOS BORNES.

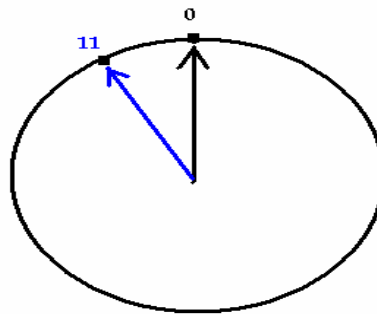
Si se consideran todas las conexiones posibles para un transformador trifásico: como se conectan los bobinados (estrella o triángulo), donde están los “puntos” y como nombro los bornes se concluye que la tensión secundaria desfaza a su correspondiente primaria EN UN MÚLTIPLO DE 30°.

En consecuencia tengo 12 casos posibles (12.30=360)⁵

Para indicar esta característica en los transformadores trifásicos configurados por los fabricantes se define el INDICE HORARIO del transformador.

INDICE HORARIO: Diferencia de ángulo entre una tensión primaria (de fase o de línea) y su correspondiente tensión secundaria. Se expresa según la posición de las agujas del reloj (en el cual “las horas están a 30°) y donde por convención la tensión primaria tomada como referencia se pone en la hora 0 (o 12) y la secundaria en el múltiplo de 30 que corresponda. La hora que resulta indica el índice horario es decir el desfazaje entre las tensiones primarias y secundarias.

Para el caso del ejemplo considerado al principio se tendrá:



La forma de indicar totalmente al grupo de conexión debe incluir el índice horario expresándose de la forma (conexión bobinados primarios)(conexión bobinados secundarios) (neutro) (índice)

Para el caso del ejemplo en el que el neutro no sea accesible será: dy11

Si el neutro fuera accesible se indica: dyn11.

En consecuencia: Si se arma un transformador a partir de tres monobásicos la forma de la conexión determina su grupo de conexión conjuntamente con el índice.

Si se tiene un transformador trifásico el fabricante siempre indica el índice de conexión y resulta por su importancia un “dato de chapa”.

III.3.5 EXPRESIÓN EN POR UNIDAD.(p.u)

Las cantidades por unidad proporcionan un procedimiento muy utilizado de notar los valores que alcanzan las magnitudes eléctricas básicas no solo en el transformador sino que se extiende a todas las máquinas eléctricas

La razón de la difusión de su uso es que facilita y simplifica el cálculo en circuitos eléctricos con transformadores y además es un medio que permite comparar las características de diferentes máquinas entre sí.

Una cantidad por unidad es simplemente la relación entre el valor real del módulo de una magnitud eléctrica (corriente, tensión,potencia,etc) y un valor predeterminado de la misma magnitud llamado **valor base**. Es por lo tanto un número adimensionado y representado por una letra minúscula.

Entonces:

$$i = \frac{I}{I_b} ; u = \frac{U}{U_b} = \frac{V}{V_b} ; z = \frac{Z}{Z_b} ; w = \frac{W}{S_b} ; q = \frac{Q}{S_b} \text{ etc.}$$

Los valores de las cantidades bases se seleccionan de la forma que mas convenga pero en principio cuando se está estudiando una máquina en particular se seleccionan sus **valores nominales**.

Ejercicio: Demostrar que la impedancia por unidad de un transformador se puede expresar como:

$$z = Z_{ohm} \frac{S_n}{U_n^2}$$

Ejercicio: *Demostrar que la impedancia de cortocircuito o de vacío de un transformador tiene el mismo valor ya sea que se refiera al lado de alto voltaje o al lado de bajo voltaje.*

Ejercicio: *Demostrar que la tensión de cortocircuito de un transformador es numericamente igual a la impedancia de cortocircuito expresada en por unidad.*

Otra de las ventajas de la expresión en p.u es que las máquinas eléctricas presentan un rango de variación restringido en los valores de sus parámetros en p.u. Por ejemplo los transformadores en un amplio rango de potencia y tensiones nominales los valores de su impedancia de cortocircuito se encuentran entre el 2 al 12 %. En general los transformadores de media tensión presentan impedancias entre 4 y 7% mientras que los de alta tensión están en el entorno del 10%.

III.3.6 FUNCIONAMIENTO EN PARALELO DE TRANSFORMADORES.

La conexión en paralelo de transformadores es muy utilizada en la práctica a los efectos de atender una carga que es superior a la potencia nominal de cada uno de los transformadores.

La configuración consiste en conectar borne a borne y en paralelo los primarios y análogamente el secundario como indica la fig 28 para el caso trifásico

El principal problema que se presenta referente al funcionamiento de transformadores en paralelo es la determinación de la manera en que se reparte la carga entre las distintas unidades. El resultado óptimo será cuando la carga se divide entre las unidades en forma proporcional a la potencias nominales de cada una de ellas y cuando la corriente que circula por el secundario de cada unidad está en concordancia de fase con la que circula por la carga. Si se divide la carga entre las unidades de otra manera, la capacidad del banco a plena carga es menor que la suma de las potencias nominales de las unidades.

A los efectos de un funcionamiento posible del paralelo se deben satisfacer condiciones de funcionamiento muy definidas.

1) Tensiones Nominales Similares. Al conectar en paralelo las tensiones a que quedan sujetos tanto el lado de alta como el de baja tensión son idénticas. En consecuencia los transformadores deberían presentar idénticas tensiones nominales de cada lado. Sin perjuicio de lo anterior es posible admitir pequeñas diferencias en las tensiones nominales de los transformadores.

2) Relación de transformación similar. Es un corolario de lo anterior. Obsérvese además que de no ser iguales las relaciones de transformación, como la tensión primaria es la misma al ser la fuente común, entonces la tensión secundaria no lo será. Esto provocará una corriente de circulación entre las unidades incluso con los transformadores en vacío como se deduce de analizar el circuito equivalente monofásico de la fig. 28. El ideal deberá ser que las relaciones sean idénticas.

3) Impedancia de c.c en p.u similares. Del análisis del circuito equivalente monofásico se deduce que si los transformadores deben repartirse la carga proporcionalmente a sus potencias nominales, sus caídas de tensión en las impedancias de c.c., deberían ser iguales para transformadores de idéntica relación de transformación. No obstante se debería exigir además que las impedancias fueran iguales no solo en módulo p.u sino también en sus argumentos, sin embargo en general esta última condición se cumple siempre en la práctica y salvo casos especiales no se pone énfasis en la misma.

Se debe observar que si los transformadores tienen relación de transformación diferente se logrará una mejor repartición de carga si además las impedancias en p.u también son “convenientemente” diferentes.

4) Idéntico índice horario. Hemos visto que los transformadores trifásicos presentan un índice horario determinado por su grupo de conexión. Este índice nos daba el desfazaje de la tensión del lado secundario respecto a la del lado primario. Como los transformadores en paralelo tienen uno de sus lados conectados a una fuente común presentan idéntica referencia de tensión en ese lado, por lo tanto no puede existir desfazaje entre las tensiones del otro lado a fin de que ambas puedan conectarse en paralelo, de existir quedarían dos fuentes con tensiones diferentes (desfazadas) en serie con las impedancias de cortocircuito de los transformadores que son de muy bajo valor estableciendo una corriente de circulación de valores absolutamente inadmisibles. Entonces es imprescindible que los índices horarios sean idénticos.

En la práctica y por razones que escapan a los límites de este curso se debe exigir que además sean de idéntico grupo de conexión.

⁵ Recuérdese que para el caso de transformadores monobásicos los casos posibles eran solo 2.

III.4. COMPORTAMIENTOS VINCULADOS A LA NO IDEALIDAD DE LA CURVA DE MAGNETIZACIÓN DEL NÚCLEO DE UN TRANSFORMADOR

DISTORSIÓN ARMÓNICA DE LA CORRIENTE DE MAGNETIZACIÓN

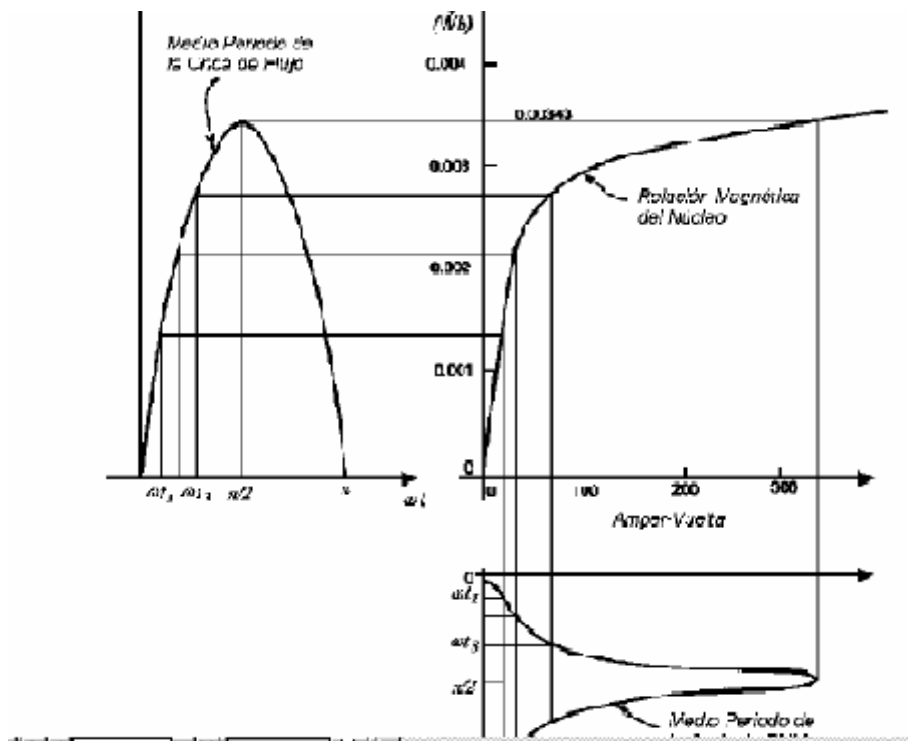
Ya ha sido explicado que en vacío la tensión primaria aplicada al bobinado de un transformador está equilibrada prácticamente con la f.em (e) debido a que en vacío la caída en la resistencia y reactancia de dispersión del bobinado son despreciables.

También sabemos que el transformador es excitado por una tensión $v(t)$ perfectamente sinusoidal. Por tanto se cumple para todo instante que:

$$\text{Si } v_1(t) = V_0 \text{ sen } \omega t \Rightarrow v_1 = -e_1 = -N_1 \frac{d\Phi}{dt} \Rightarrow \Phi = \Phi_m \cos \omega t.$$

Entonces, la tensión primaria senoidal produce un flujo senoidal en vacío.

Pero la curva de magnetización del hierro, que relaciona Φ con la corriente de magnetización es de forma no lineal y del tipo indicado en el capítulo de circuitos magnéticos, en el supuesto todavía que no existe histéresis, por lo que si tengo un andamio sinusoidal en el eje de ordenada no tendré un andamio del mismo tipo en el eje de abscisas sino que tendrá el andamio indicado en la figura que no se puede afirmar que sea senoidal.



Sin embargo, si para los hierros usualmente utilizados resolviéramos la curva de la corriente de magnetización i_Φ por series de Fourier se encontrará que el desarrollo queda dominado por la fundamental (la frecuencia de trabajo impuesta por la excitación) **y por el componente de tercer armónica.** Luego:

Este resultado es general, y una mejor aproximación de la forma de onda de la corriente magnetizante es que está compuesta por la suma de una fundamental y su tercer armónica. Entonces:

$$i_F(t) = I_{01} \text{ sen}(\omega t + j) + I_{03} \text{ sen } 3(\omega t + j)$$

A este fenómeno que acontece con la corriente de magnetización se le suele llamar **distorsión armónica de la corriente de vacío de los transformadores.**

El resultado anterior se aplican en vacío. Cuando se carga el transformador, la corriente de carga es sinusoidal (siempre que la carga sea lineal como en general acontece) y además mucho mayor que la corriente de magnetización por lo cual la corriente total que es la suma de ambas es aproximadamente sinusoidal y este fenómeno de distorsión armónica no es tenido en cuenta.

II) LA TERCERA ARMÓNICA EN LA OPERACIÓN DE LOS TRANSFORMADORES TRIFÁSICOS.

La componente de tercera armónica de la corriente de excitación puede producir efectos indeseados en la operación de los transformadores trifásicos, particularmente en la conexión Y/Y.

Consideremos una conexión YY de un banco de transformadores en vacío alimentados por una fuente trifásica equilibrada y de tal manera que sus neutros están vinculados.

Sabemos que se debe cumplir que:

$$i_a + i_b + i_c + i_n = 0$$

Pero sabemos que el desfase entre las corrientes es 120 grados y que las corrientes tiene la componente fundamental y la tercer armónica, por lo tanto la corriente de neutro i_N debe llevar sólo tres veces la componente de tercer armónica de cada una de las corrientes de línea.

Pero que sucede si abrimos el neutro, entonces la corriente de neutro será nula por lo que la corriente de tercer armónico de la corriente de línea también deberán ser nulas. Como resultado de esto entonces el flujo no podrá ser senoidal y deberá ser este flujo ahora el que tenga tercer armónica par compensar la no existencia del mismo en la corriente de excitación.

Pero este flujo generará un **voltaje de tercera armónica en los voltajes de línea a neutro del transformador.**

Observar que no existe tercer armónico en los voltaje de línea puesto que $V_{ab} = V_a - V_b$.

En consecuencia para la conexión YY con neutro flotante aparece una tensión de tercer armónico en las tensiones fase neutro del transformador.

Este efecto no acontece con el resto de las posibles conexiones de un transformador trifásico.

Cuando los primarios se conectan en triángulo no habrá ninguna componente de la tercera armónica en las corrientes de líneas puesto que estas surgen como diferencia de las corrientes de fase que circulan por cada bobinado que si tendrán el componente de tercer armónica. Luego para esta conexión las corrientes de tercera armónica circulan en el triángulo y no se provoca distorsión alguna en los flujos magnéticos por lo que las tensiones serán todas sinusoidales.

Si, por otra parte, tenemos ahora una conexión YΔ con el neutro de la Y flotando, circulará por el bobinado secundario, esto es en el triángulo el componente de tercera armónica que permite que los flujos no se distorsionen y tener una tensión fase neutro del lado primario sinusoidal pura a pesar que las corrientes de línea primaria no tenganel componente de tercera armónica

Las consideraciones anteriores permiten mostrar la importancia que tiene una conexión Δ en un transformador como forma de que el efecto de distorsión armónica no se propague a las tensiones del transformador haciendo que estas se mantengan perfectamente balanceadas.

Esta es la razón de la popularidad de la conexión YΔ o su inversa, prácticamente utilizada en la generalidad de los transformadores trifásicos en las aplicaciones industriales.

Donde se requiere una transformación YY (por necesidad de disponer de neutro, por ej.), es muy común que al transformador se le incorpore un bobinado terciario auxiliar conectado en triángulo que tiene como fin primordial evitar la distorsión armónica en las tensiones.

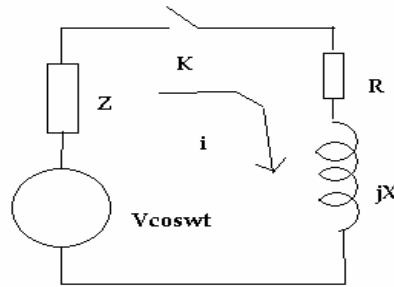
III) LA CORRIENTE DE ENERGIZACIÓN DE LOS TRANSFORMADORES.

Frecuentemente cuando se energiza un transformador de potencia, esto es, se aplica la tensión nominal partiendo del equipo sin tensión aplicada, aparece un impulso de corriente de excitación que puede alcanzar en forma instantánea y transitoria valores muy elevados del orden de 10 veces la corriente nominal del bobinado que se excita, esto sin perjuicio de que los otros lados del transformador estén o no en carga. Luego de un corto tiempo esta corriente de energización cae a los valores usuales de la corriente de magnetización de régimen (3 a 5% de la nominal)

A este comportamiento transitorio inicial de la corriente de magnetización se le denomina corriente de energización o corriente de impulso de los transformadores

Por que acontece este efecto?

Cuando se estudia un circuito magnético lineal, como el indicado en la figura :



desde el instante $t=0$ en que se cierra la llave K hasta que la corriente i llega a régimen permanente, esta corriente tiene un componente transitoria de continúa con un valor inicial de a lo sumo igual a la amplitud de la componente de alterna y que decae exponencialmente en el tiempo con una constante de tiempo que vale R/L y que nos indica que a mayor pérdidas tenga el circuito mas pronunciada es la caída de la componente continúa de la corriente⁶.

Este simple circuito, representa una primera aproximación a lo que sucede cuando energizamos el bobinado primario de un transformador y nos da una primera razón de por que la corriente de magnetización de un transformador puede ser elevada. Sin embargo, bajo las mismas condiciones que el circuito representa, la corriente de impulso en un transformador de potencia es mucho mayor y esto se explica cuando tenemos en cuenta la saturación del hierro, donde en el circuito elemental hace que L deje de ser constante disminuyendo apreciablemente su valor. Se debe comprender que la causa de la corriente de impulso es el componente amortiguado de continua (que satura la magnetizante del transformador) y que la “velocidad” con la que este desaparece se relaciona con las pérdidas del circuito que para el caso de un transformador serán la resistencia del bobinado y las pérdidas en el hierro.

Veamos, en una primera aproximación, a que valor puede alcanzar el primer impulso de la corriente de magnetización de un transformador.

Como ya hemos visto en repetidas ocasiones, cuando excito un transformador con una tensión v sinusoidal perfecta ,tenemos despreciando la caída de tensión en la impedancia de c.c que:

$$\text{Si } v_1(t) = V_0 \text{sen}(wt + j) \Rightarrow v_1 = -e_1 = -V_0 \text{sen}(wt + j) = N_1 \frac{df}{dt}$$

Supongamos que en el instante $t=0$ aplicamos la tensión $v_1(t)$. El andamiento del flujo surge de integrar la ecuación anterior entre 0 y t por lo que tendremos que :

Si calculo la integral obtengo entonces que:

$$f(t) = \frac{V_0}{N_1} \int_0^t \text{sen}(wt + j) .dt + f(0) \text{ donde } f(0) = f_r \text{ flujo residual del hierro en } t = 0$$

$$f(t) = \left[-\frac{V_0}{\omega N_1} \cos(wt + j) \right] + \left[\frac{V_0}{\omega N_1} \cos j + f_r \right]$$

$$\text{que equivale a } f(t) = \left[-f_M \cos(wt + j) \right] + \left[f_M \cos j + f_r \right]$$

Aparece entonces en la expresión anterior el componente de régimen del flujo que es sinusoidal, y el componente de continua en el instante inicial.

Pero si evaluamos el flujo en el instante $t=\pi/\omega$ y asumiendo que el componente de continua mantiene aproximadamente su valor, resulta que el valor del flujo en el núcleo vale:

$$f\left(\frac{\pi}{\omega}\right) = 2.f_M \cos j + f_r$$

El valor de ϕ nos indica el valor de la tensión de excitación en el instante de cierre de K, por lo que el peor caso es que cerremos la llave K cuando $\phi=0$ y para ese caso el valor del flujo deberá alcanzar mas de dos veces su valor máximo en régimen. Si tenemos en cuenta ahora la curva de magnetización del hierro es fácil ver por que la corriente inicial puede alcanzar valores tan elevados

⁶ Este transitorio ha sido resuelto como caso típico en el curso de Sistemas Lineales.

ASPECTOS CONSTRUCTIVOS BÁSICOS DEL TRANSFORMADOR.

Existe una amplísima bibliografía descriptiva sobre los aspectos constructivos de los transformadores. Por otra parte este capítulo da lugar a toda una disciplina como es el Cálculo y Diseño de Maquinas Eléctricas, que escapa totalmente a los objetivos de este curso.

En lo que sigue solo se detallaran aquellos aspectos constructivos y accesorios que componen un transformador de potencia que se consideran básicos de conocer.

En general las Máquinas Eléctricas están construídas para ser excitadas por fuentes de tensión de baja frecuencia (50 o 60Hz). Consideraremos entonces transformadores de potencia de baja frecuencia no incluyéndose transformadores para alta frecuencia como por ej. los transformadores en aplicaciones de comunicaciones.

Existen tres tipos principales de transformadores monofásicos : Los de columna, los acorazados y los de espiral.⁷

En todos los casos el núcleo se construye laminado, con láminas barnizadas o revestidas a fin de aislarlas y atenuar las pérdidas por corrientes de Foucault.

El material del núcleo lo constituyen una amplia variedad de aceros con contenidos variables de Silicio que resultan en una amplia gama de valores de permeabilidad , nivel de saturación y de pérdidas del hierro que resultan en una gran variedad de costos.

Aunque la calidad del hierro dependerá significativamente de la aplicación del equipo y su costo total. Salvo los de espiral que se utilizan para muy bajas potencias, las láminas que componen el núcleo están cortadas en L o E, en estas se introducen las bobinas para luego cerrándolas formar el núcleo.

En las figuras se observa el montaje de las laminaciones y de las bobinas.

Los transformadores trifásicos como único equipo, es aquel en donde los núcleos y bobinados para las tres fases, están combinados en una sola estructura como muestra la fig(pag115 deMatch) para los tipos de columna o acorazado.

La razón del uso de los transformadores trifásicos frente a un banco monofásico son razones de espacio y de costo.

Bobinados: Las bobinas de los transformadores están devanadas usualmente bajo las formas de tipo **cilindro** o de tipo **disco** de sección circular o rectangular.. El conductor de las bobinas está aislado por papel, algodón, cartón o micarta. Estos cilindros o discos pueden tener una o mas capas de bobinas, las cuales pueden estar apiladas juntas o separadas variando esto en función de la refrigeración necesaria. Cilindros aislantes usualmente de cartón separan los bobinados del núcleo y entre sí, encontrándose siempre el de baja tensión mas cerca del núcleo al resultar ser el mas fácil de aislar.

Los núcleos y las bobinas deben estar provistos de soportes mecánicos que impidan el movimiento cuando el bobinado es sometido a un cortocircuito, golpes etc. Un movimiento relativo de estos componentes puede provocar un daño en la aislación. Un buen soporte reduce además el ruido y la vibración en la operación del transformador.

El núcleo y el bobinado constituye lo que se llama **parte activa** del transformador.

Enfriamiento: Los transformadores pueden enfriarse por aire, aceite o agua. Lo común son de aire para los de baja tensión y potencia y en aceite para el resto. El aceite además tiene como función mejorar las condiciones de aislación entre las partes con tensión del núcleo y de este con la cuba.

Cualquiera que sea el método de enfriamiento el problema esencial es el de transferir el calor del hierro y cobre generado por sus pérdidas al medio refrigerante.

Esta transferencia puede realizarse por convección natural o forzada a través de la circulación forzada del aceite

La disipación del calor del aceite al medio ambiente usualmente aire o agua se hace a través de los radiadores. La circulación del medio refrigerante podrá ser también natural o forzada.

En base a lo anterior es que cuando se expresa la potencia nominal de un transformador se deberá decir en que condiciones de ventilación y circulación de aceite se hace, indicándose universalmente como:

ONAN: oil natural, aire natural.

ONAF: oil natural, aire forzado.

OFAF: oil forzado, aire forzado.

En la práctica lo anterior es muy importante pues puede elevar la potencia nominal de un transformador en el orden de un 20 % si lo paso de ONAN a ONAF. (solo mejorando lo ventilación).

⁷ Las figuras y esquemas se muestran en clase.

Montaje: Lo usual es que la parte activa se introduzca dentro de una cuba la cual se llena de aceite aislante para transformadores. Esta cuba se tapa, mientras que los terminales del transformador salen por la tapa aislados de la misma por aisladores pasantes a los cuales se les llama **bushing**.

Sobre la tapa del transformador puede existir un **tanque de expansión** que es el elemento destinado a absorber las variaciones de volumen del aceite por cambios en su temperatura. Este tanque puede ser sellado o abierto a la atmósfera. En este último caso y con el fin de que el aceite no se contamine con humedad se instala en los respiradores los llamados **filtros de silicagel** material este que retiene la humedad del aire.

Conmutadores: Es muy usual que interese tener algún control sobre la tensión de salida de un transformador, en general que la misma se lo mas constante posible. Por otra parte en general la tensión primaria no es constante por lo que se implementan los llamados conmutadores, los cuales consisten en extraer del primario varias conexiones de forma de poder alterar la relación de vueltas de los bobinados y con ello la de transformación. Estos conmutadores pueden ser para operar en carga (alto costo) por los cuales se puede implementar control automático de la tensión o sin carga con el transformador desconectado de la red.

Lo usual es que para transformadores de baja o media tensión se disponga conmutación sin carga con saltos de 2,5% y para alta tensión sean en carga con saltos de 1%.

Mantenimiento sobre el aceite. Respecto a la función del aceite como aislante es importante tomar adecuadas precauciones de mantenimiento para que esta función se cumpla adecuadamente.

Las normas básicas y mínimas a tener en cuenta son:

- a) Nivel de aceite. Debe mantenerse en los niveles adecuados puesto que en general los bushings también lo utilizan como aislante.
- b) Humedad del aceite. La humedad del aceite no debe superar ciertos límites pues baja abruptamente la capacidad dieléctrica del aislante.
- c) Acidez del aceite. También debe estar por debajo de ciertos valores pues el aceite con elevados niveles de acidez ataca la aislación de papel de los bobinados.
- d) Medida de la rigidez dieléctrica del aceite. Es con lo que se monitorea el nivel de humedad
- e) Gases disueltos. En transformadores grandes se deben realizar los llamados análisis cromatográficos de gases disueltos puesto que permite detectar la existencia de puntos calientes dentro de la parte activa.
- f) Medida de "Tangente Delta". Medida mas precisa que la de rigidez dieléctrica del aceite.

Protecciones propias de un transformador. Existen varios sensores que se instalan en los transformadores, para detectar fallas, prevenirlas o cuando la falla ha ocurrido minimizar los daños.

- a) Nivel de aceite. El dispositivo se coloca usualmente en el tanque de expansión por debajo de cierto valor da una alarma o dispara el disyuntor del transformador quitandolo de servicio.
- b) Temperatura de aceite: Son termómetros que miden la temperatura del aceite mas cercana a la tapa , implementándose alarmas y disparo.
- c) Temperatura del punto caliente de la parte activa. Es un dispositivo llamado "relé de imagen térmica" que en forma indirecta estima el valor de la temperatura máxima que puede estar el bobinado del transformador. Este valor es de interés pues la temperatura del bobinado es lo que determina la vida útil del papel que se utiliza como aislante. La idea del dispositivo es que a un termómetro que mide la temperatura del aceite se le agrega una resistencia calefaccionada por la corriente secundaria de un TC cuya corriente primaria es la del transformador.
- d) Relé Bucholz: Cuando existe una falla interna del bobinado o puntos calientes en el núcleo puede llegar a aumentar puntualmente la temperatura del aceite lo cual provoca la formación de gases. Estos gases tenderán a elevarse a la parte mas alta del transformador es decir hacia el tanque de expansión. En estas condiciones en el caño que vincula la cuba con el tanque se coloca este relé, el cual es un dispositivo diseñado de tal manera que "atrapa" la burbuja ascendente y acciona un flotador el cual a su vez acciona un contacto el cual provoca una alarma o un disparo. Posteriormente es posible extraer del relé estos gases los cuales mediante un análisis espectrográfico permite detectar el posible origen de la falla.