

TRANSFORMADORES DE POTENCIA

Introducción:

El transformador es una máquina estática destinada a la transformación de unos valores de tensión y corriente alternos (primarios) en otros diferentes (secundarios).

Los diferentes tipos de transformadores se pueden clasificar de diferentes maneras. Por ejemplo:

- Según la cantidad de arrollamientos en transformadores de dos, tres o más arrollamientos.
- Según la cantidad de fases en monofásicos, trifásicos y polifásicos.
- Según la utilización en transformadores de potencia y de medición.
- Según los valores de las tensiones primaria y secundaria en reductores, elevadores y separadores o aisladores.

En este apunte trataremos los transformadores de potencia

A.- TRANSFORMADOR MONOFÁSICO

1.- PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO

a) Fuerzas electromotrices primaria y secundaria

Para desarrollar el principio de funcionamiento de los transformadores vamos a trabajar con un transformador monofásico de dos arrollamientos y en el cual las tensiones primaria y secundaria son iguales.

El esquema básico de este transformador se muestra en la figura. 1

Con **P** designamos al bobinado primario y con **S** al secundario.

En el bobinado secundario no hay conectada ninguna carga, por lo que se dice que el transformador está en vacío.

Al bobinado primario aplicamos una tensión alterna de valor instantáneo u_1 . Al estar en vacío el transformador, circula por el primario una corriente i_0 que se llama corriente de vacío. Esta corriente produce el flujo magnético φ que en su mayor parte se cierra sobre el núcleo del transformador. Una muy pequeña parte del mismo se dispersa por el aire pero puede desprejarse. Por ser alterna la corriente que lo genera, φ también lo es y su variación induce en los dos devanados fuerzas electromotrices que llamamos e_1 y e_2 respectivamente.

A continuación pasaremos a determinar las expresiones que definen los valores eficaces de E_1 y E_2 puestas en función de parámetros del transformador. Para ello comenzamos con la determinación de los valores instantáneos:

De acuerdo con la Ley de Faraday

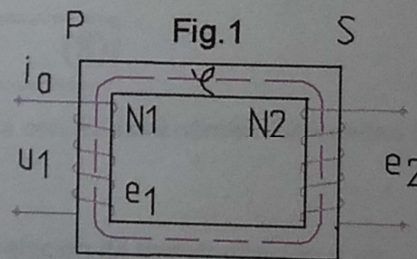
$$e_1 = -N_1 \frac{d\varphi}{dt} \quad (1)$$

Para desarrollar esta expresión debemos reemplazar el flujo magnético por su ecuación. Sabemos que el flujo es senoidal, por lo tanto escribimos

$$\varphi = \Phi_{max} \text{sen } \omega t \quad (2)$$

Entonces:

$$\frac{d\varphi}{dt} = \Phi_{max} \omega \text{cos } \omega t \quad (3)$$



Pero, como

$$\cos \omega t = -\operatorname{sen}\left(\omega t - \frac{\pi}{2}\right)$$

Podemos reemplazar en (3) quedando:

$$\frac{d\varphi}{dt} = -\Phi_{max} \omega \operatorname{sen}\left(\omega t - \frac{\pi}{2}\right) \quad (4)$$

y, reemp. (4) en (1), la fuerza electromotriz queda:

$$e_1 = N_1 \Phi_{max} \omega \operatorname{sen}\left(\omega t - \frac{\pi}{2}\right) \quad (5)$$

Como se ve a partir de la última ecuación, la f.e.m. inducida es también senoidal y el valor máximo es

$E_{1max} = N_1 \Phi_{max} \omega$. Y el valor eficaz es:

$$E_1 = \frac{E_{1max}}{\sqrt{2}} = \frac{N_1 \Phi_{max} \omega}{\sqrt{2}} \quad (6)$$

La pulsación es $\omega = 2\pi f$, y si la reemplazamos en (6) queda $E_1 = \frac{2\pi f N_1 \Phi_{max}}{\sqrt{2}}$

y, operando, el valor eficaz de la f.e.m. primaria es

$$E_1 = 4,44 N_1 f \Phi_{max} \quad (7)$$

Como el flujo magnético se cierra por toda la longitud del núcleo, atraviesa la bobina secundaria, y en ésta también se va a producir una f.e.m. inducida.

El valor eficaz de esta f.e.m. es

$$E_2 = 4,44 N_2 f \Phi_{max} \quad (8)$$

porque al depender del mismo flujo magnético la única diferencia con E_1 es el número de vueltas del bobinado.

b) relación de transformación

La relación entre las fuerzas electromotrices E_1 y E_2 se llama relación de transformación y se

escribe $k = \frac{E_1}{E_2} = \frac{N_1}{N_2}$ porque los demás componentes de las expresiones de E_1 y E_2 son co-

munes y se simplifican.

De esta manera se ve que la relación entre las f.e.m.s primaria y secundaria depende únicamente de los números de vueltas de las bobinas primaria y secundaria, lo cual hace sumamente económica y sencilla la variación de tensiones y/o corrientes en alterna.

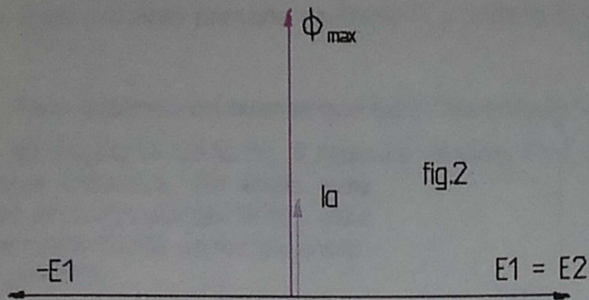
2.- DIAGRAMAS VECTORIALES

Al ser magnitudes senoidales las que intervienen en el estudio del transformador, éstas pueden representarse vectorialmente, lo que ayuda en la interpretación y a la hora de realizar cálculos en los que intervengan dichas magnitudes. Por esa razón comenzaremos dibujando el diagrama vectorial para el transformador ideal en vacío, teniendo en cuenta también que la relación de transformación.

de este transformador es igual a uno.

a) Diagrama vectorial del transformador ideal en vacío

De acuerdo con la expresión (5) las fuerzas electromotrices E_1 y E_2 están atrasadas 90° con respecto al flujo magnético. Al no tener pérdidas magnéticas por considerarse un transformador ideal, la corriente I_0 está en fase con el flujo. Y como tampoco tiene caídas de tensión, la tensión aplicada es igual a $-E_1$.

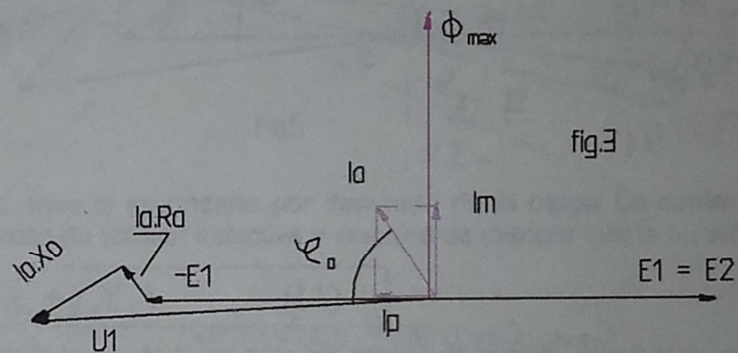


La figura 2 es, por lo tanto, el diagrama vectorial de un transformador monofásico ideal en vacío.

b) Diagrama vectorial del transformador real en vacío

En el transformador real hay pérdidas y caídas de tensión. Esto afecta al diagrama vectorial modificándolo. Estas modificaciones las vamos a ir viendo paso a paso:

Al aparecer las pérdidas, la potencia que el transformador debe tomar de la red se incrementa. Este incremento solamente puede manifestarse a través del aumento de la intensidad de corriente ya que la tensión que nos provee la red es constante. Este aumento de I_0 lo representamos en el diagrama vectorial con una componente de I_0 horizontal y con el sentido de $-E_1$. Esto porque la potencia de pérdida



es una potencia activa. Esta componente se llama I_p (intensidad de pérdidas). La componente magnetizante tiene el mismo valor que la I_0 del diagrama anterior porque el flujo se mantiene constante. Al componerse I_m e I_p dan como resultante a la nueva I_0 que es mayor que en el transformador ideal y está desfasada en adelante con respecto al flujo $\Phi_{m\acute{a}x}$. Las caídas de tensión que produce la corriente I_0 en el primario hacen que la f.e.m. E_1 se reduzca ya que la tensión primaria (la que provee la red) será

$$\bar{U}_1 = -\bar{E}_1 + \bar{I}_0 (R_0 + jX_0) \quad (9)$$

Donde R_0 y X_0 son la resistencia y la reactancia del bobinado primario en vacío respectivamente.

Cabe aclarar que las corrientes I_p e I_m son sólo componentes de I_0 . También E_1 , $I_0 R_0$ e $I_0 X_0$ son componentes de U_1 . Estas componentes se utilizan al sólo fin de aclarar la interpretación del funcionamiento del transformador. Las únicas magnitudes que aparecen en el transformador en la práctica son U_1 , I_0 y E_2 .

c) Diagrama vectorial del transformador real en carga

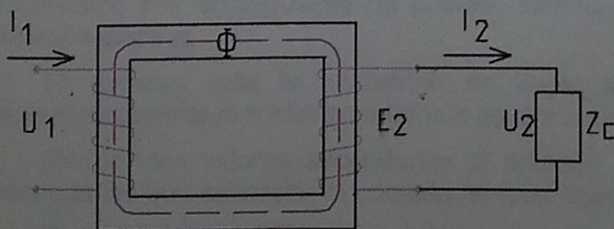


Fig.4

Cuando se le conecta una carga al secundario del transformador circula por este bobinado una corriente I_2 como se muestra en la fig. 4.

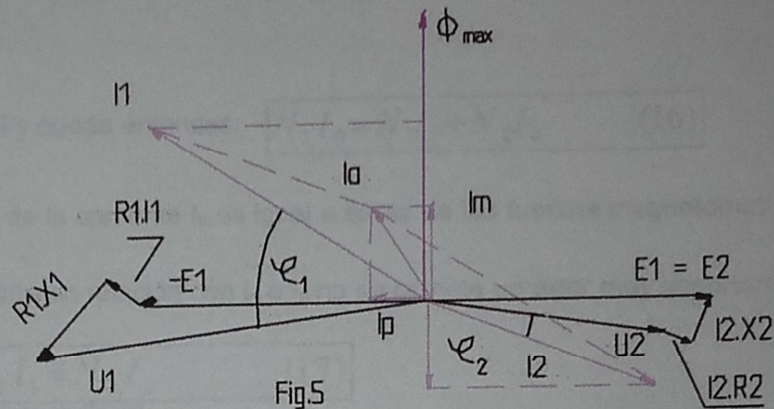
Esta corriente tiene una componente desmagnetizante que reduciría el flujo Φ . Como este flujo depende únicamente de la tensión, es constante mientras esta última lo sea. Por lo tanto aparece una corriente en el primario que compensa esa componente desmagnetizante.

te. Esta corriente primaria se llama I_1 y cumple la condición de que: $\bar{I}_1 + \bar{I}_2 = \bar{I}_0$ (10)

Esto teniendo en cuenta que estamos trabajando con un transformador con $k = 1$.

El diagrama de la fig. 5 muestra el diagrama vectorial del transformador real en carga para una carga inductiva. Se eligió este tipo de carga por ser la que más frecuentemente se encuentra en la práctica.

La corriente I_2 atrasa a la f.e.m. E_2 y tiene una componente desmagnetizante (sentido opuesto a I_m). Para compensar esta componente se crea en el primario la corriente I_1 que tiene una componente vertical del mismo valor que la componente desmagnetizante y por consiguiente la anula.



Esa corriente primaria es la que provee la potencia que se transfiere al secundario por demanda de la carga. La corriente I_1 produce en el devanado primario caídas de tensión inductiva y resistiva de manera que la tensión U_1 resulta ser:

$$\bar{U}_1 = -\bar{E}_1 + \bar{I}_1(R_1 + jX_1) \quad (11)$$

En el secundario pasa algo similar: la corriente I_2 produce las caídas de tensión que hacen que la tensión realmente aplicada a la carga sea:

$$\bar{U}_2 = \bar{E}_2 - \bar{I}_2(R_2 + jX_2) \quad (12)$$

3.- REDUCCIÓN AL PRIMARIO DE LOS VALORES SECUNDARIOS

Hasta ahora habíamos trabajado con un transformador cuya relación de transformación era igual a uno; sin embargo esa no es la condición normal porque la inmensa mayoría de los transformadores modifican tensión o corriente y las relaciones de transformación son diferentes de uno. Por ejemplo tomemos un transformador de uso muy generalizado como lo es el transformador rural. Este transformador reduce la tensión de fase de un sistema de media tensión a la tensión de fase de un sistema de baja tensión, es decir que la tensión primaria es de 7.621 V y la secundaria de 231 V. La relación de transformación resulta ser igual a 33. En este caso, ya no se pueden relacionar directamente las magnitudes del transformador como veníamos haciendo. Por ejemplo, no podría realizarse la siguiente operación

$$\bar{I}_1 + \bar{I}_2 = \bar{I}_0 \quad (10)$$

debido a que las corrientes I_1 e I_0 circulan por el bobinado primario y la corriente I_2 lo hace por el secundario. Por consiguiente no pueden sumarse corrientes que circulan por diferentes circuitos aislados entre sí.

Lo anterior más la necesidad de llegar a un circuito equivalente que permita analizar matemáticamente al transformador nos lleva a la reducción de valores secundarios al primario.

Reducir los valores secundarios al primario significa encontrar valores para las magnitudes secundarias que aplicadas al primario no modifiquen el funcionamiento del transformador.

Comenzamos sabiendo que el flujo magnético producido por la corriente I_0 es el resultante de la suma de los flujos producido por I_1 e I_2 .

Estos flujos dependen de lo números de vueltas de los bobinados, de las intensidades de corriente y de la reluctancia del núcleo:

$$\varphi_0 = \varphi_1 + \varphi_2 \quad (13)$$

Reemplazando en 13 resulta:

$$\varphi_0 = \frac{N_1 I_0}{\mathfrak{R}} \quad \varphi_1 = \frac{N_1 I_1}{\mathfrak{R}} \quad \varphi_2 = \frac{N_2 I_2}{\mathfrak{R}} \quad (14)$$

$$\frac{N_1 I_0}{\mathfrak{R}} = \frac{N_1 I_1}{\mathfrak{R}} + \frac{N_2 I_2}{\mathfrak{R}} \quad (15)$$

Las reluctancias se anulan entre si y queda entonces:

$$N_1 I_0 = N_1 I_1 + N_2 I_2 \quad (16)$$

Es decir: la fuerza magnetomotriz de la corriente I_0 es igual a suma de las fuerzas magnetomotrices de las corrientes I_1 e I_2 .

Como la corriente I_0 es muy pequeña en relación con I_1 e I_2 no se comete un error muy importante si se la desprecia y se escribe:

$$N_1 I_1 \cong N_2 I_2 \quad (17)$$

De esta última expresión se puede despejar I_1

$$I_1 \cong I_2 \frac{N_2}{N_1} \quad (18) \quad I_1 \cong \frac{I_2}{k} \quad (19)$$

O sea:

A esta relación entre I_2 y k (muy parecida a I_1) la llamaremos

I'_2 : CORRIENTE SECUNDARIA REDUCIDA AL PRIMARIO

$$I'_2 = \frac{I_2}{k} \quad (20) \quad \text{Por otra parte tenemos que}$$

De donde:

$$k = \frac{E_1}{E_2} \quad E_1 = k \cdot E_2$$

y definimos

$$E'_2 = k \cdot E_2 \quad E'_2: \text{F.E.M. SECUNDARIA REDUCIDA AL PRIMARIO}$$

También:

$$U'_2 = k \cdot U_2 \quad U'_2: \text{TENSIÓN SECUNDARIA REDUCIDA AL PRIMARIO}$$

La impedancia de carga es:

$$Z_c = \frac{U_2}{I_2} \quad Z'_c = \frac{U'_2}{I'_2} = \frac{k \cdot U_2}{\frac{I_2}{k}} = k^2 \cdot \frac{U_2}{I_2} = k^2 \cdot Z_2 \quad \text{reducidos:}$$

Si reemplazamos los valores reducidos:

$$Z'_c = k^2 \cdot Z_c \quad Z'_c: \text{IMPEDANCIA DE CARGA REDUCIDA AL PRIMARIO}$$

trasladando esto a la impedancia secundaria queda:

$$Z'_2 = k^2 \cdot Z_2 \quad Z'_2: \text{IMPEDANCIA SECUNDARIA REDUCIDA AL PRIMARIO}$$

Por analogía:

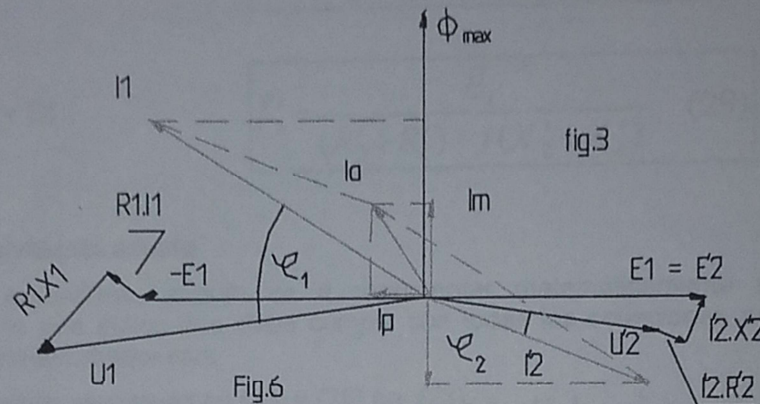
$$R'_2 = k^2 \cdot R_2$$

R'2: RESISTENCIA SECUNDARIA REDUCIDA AL PRIMARIO

$$X'_2 = k^2 \cdot X_2$$

X'2: REACTANCIA SECUNDARIA REDUCIDA AL PRIMARIO

Con esto el último diagrama vectorial quedaría correctamente dibujado como se ve en la figura 6.



4.- CIRCUITO EQUIVALENTE

El circuito equivalente del transformador representa analíticamente el funcionamiento del mismo. Es, en consecuencia, un modelo matemático del transformador.

Previo al desarrollo del circuito equivalente vamos a obtener algunas expresiones matemáticas del diagrama vectorial de la fig. 6:

$$\bar{U}_1 = -\bar{E}_1 + \bar{I}_1(R_1 + jX_1) \quad (21)$$

$$\bar{U}_2 = \bar{E}_2 - \bar{I}_2(R'_2 + jX'_2) \quad (22)$$

$$\bar{I}_0 = \bar{I}_1 + \bar{I}'_2 \quad (23)$$

$$\bar{I}_0 = \bar{I}_p + \bar{I}_m \quad (24)$$

Además, de la diferencia entre las corrientes I_0 e I_1 se desprende que en el transformador, según el estado de funcionamiento, la impedancia primaria toma diferentes valores. Efectivamente, en vacío la corriente que circula por el devanado primario es I_0 y su valor es constante. Cuando se conecta una carga al secundario aparecen las corrientes I_2 e I_1 . Esta última circula por el primario y es mucho mayor que I_0 , o que se interpreta como una disminución de la impedancia de ese bobinado. Se puede inferir que este bobinado tiene impedancia constante en vacío y variable en carga y que en este último caso su valor depende de la corriente de carga.

Se puede escribir entonces:

$$I_0 = \frac{-E_1}{Z_0} \quad (25)$$

O bien, utilizando la admitancia:

$$I_0 = -E_1 Y_0 = -E_1 (G_0 - jB_0) \quad (26)$$

En el circuito secundario la impedancia total está constituida por la suma de la impedancia propia del devanado secundario del transformador y la impedancia de carga:

$$(R'_2 + R'_c) + j(X'_2 + X'_c) \quad (27)$$

Por lo tanto la corriente I'_2 valdrá:

$$\bar{I}'_2 = \frac{\bar{E}'_2}{(R'_2 + R'_c) + j(X'_2 + X'_c)} \quad (28)$$

Pero como $E'_2 = E_1$:

$$\bar{I}'_2 = \frac{\bar{E}_1}{(R'_2 + R'_c) + j(X'_2 + X'_c)} \quad (29)$$

a) Circuito equivalente exacto

El circuito equivalente exacto va a representar matemáticamente al funcionamiento del transformador, lo que indica que debe cumplir con todas las ecuaciones anteriores, ya que éstas pertenecen al transformador real.

Operando con ellas, reemplazamos (26) y (29) en (23): $-E_1 Y_0 = I_1 + \frac{E_1}{(R'_2 + R'_c) + j(X'_2 + X'_c)}$

De ésta se despeja I_1 quedando:

$$I_1 = -E_1 Y_0 - \frac{E_1}{(R'_2 + R'_c) + j(X'_2 + X'_c)}$$

$$I_1 = -E_1 \left[Y_0 - \frac{1}{(R'_2 + R'_c) + j(X'_2 + X'_c)} \right]$$

y reemplazando en (21)

$$\bar{U}_1 = I_1 \left[(R_1 + jX_1) + \frac{1}{Y_0 - \frac{1}{(R'_2 + R'_c) + j(X'_2 + X'_c)}} \right] \quad (30)$$

Analizando esta ecuación vemos que lo encerrado entre corchetes es una impedancia ya que multiplicado por I_1 nos da una tensión U_1 . Dicha impedancia es la total del transformador incluida la carga, es decir, la impedancia que "ve" la fuente de energía, por lo que podemos llamarla "**impedancia total equivalente**". Esta impedancia está compuesta por los elementos básicos de un circuito eléctrico serie-paralelo. Según la ecuación, la distribución de esos elementos se da como muestra la figura 7.

Los elementos mencionados son resistencias e inductancias. La distribución de ellas se hizo de manera que, matemáticamente, este circuito representa al transformador.

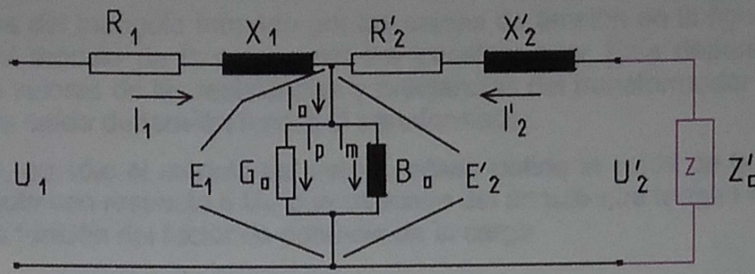


Fig. 7

Si representamos vectorialmente las tensiones y corrientes del circuito cuando representa a un transformador en carga se obtiene un diagrama como el de la figura 8.

En esta figura se ve que al aplicar una tensión U_1 a la entrada del circuito equivalente circula una corriente I_1 que produce las caídas de tensión $I_1 \cdot R_1$ e $I_1 \cdot X_1$. Al restar estas caídas de tensión de la tensión U_1 se obtiene la f.e.m. E_1 que es igual a E'_2 . Como esta f.e.m. está aplicada al circuito formado por R'_2 y X'_2 , genera la corriente I'_2 que produce las caídas de tensión $I'_2 \cdot R'_2$ e $I'_2 \cdot X'_2$. Restadas de E'_2 se obtiene la tensión U'_2 que es la tensión de salida reducida al primario.

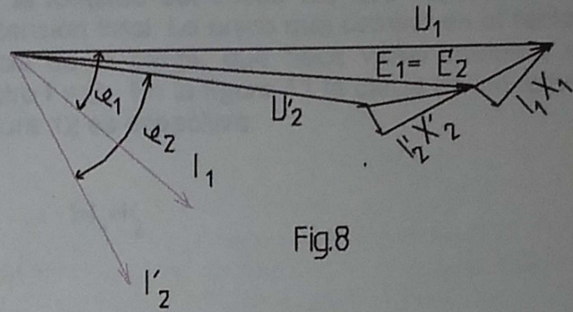


Fig.8

b) Circuito equivalente aproximado

El circuito anterior es el que representa exactamente el funcionamiento del transformador. Sin embargo, para la mayoría de las aplicaciones del circuito equivalente no es necesario una exactitud estricta. Por eso en el diseño y ensayo de transformadores chicos y medianos se utiliza el circuito equivalente aproximado.

Este circuito se obtiene al despreciar las caídas de tensión que produciría I_0 en el bobinado primario. Por lo tanto podemos trasladar la admitancia de vacío a la entrada del circuito quedando este tal como se ve en la figura 9.

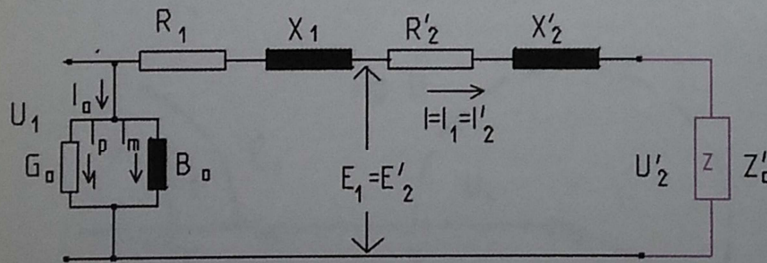


Fig.9

En este circuito se admite el error que se comete al suponer $I_1=I'_2$, que no es significativo, y que origina una simplificación en el circuito y en su resolución.

Efectivamente, el circuito de potencia del transformador queda reducido a una impedancia inductiva cuyos componentes son $(R_1 + R'_2)$, $(X'_1 + X'_2)$ y la admitancia de vacío. Si el transformador está cargado se agrega la impedancia de carga Z'_c .

El diagrama vectorial de este circuito también se simplificó ya que sólo hay una sola corriente que es I . Esta produce las caídas de tensión $I \cdot (R_1 + R'_2)$ e $I \cdot (X_1 + X'_2)$ que definen el vector U'_2 . Lo muestra la fig. 10.

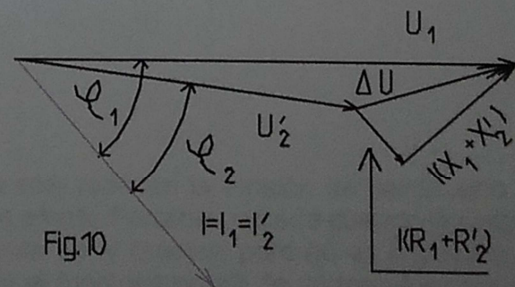
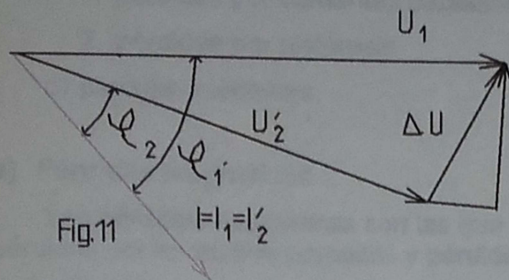


Fig.10

5.- VARIACIÓN DE LA TENSIÓN SECUNDARIA EN FUNCIÓN DE LA CARGA

La hipotenusa del triángulo formado por las caídas de tensión en la figura 10 (ΔU) es un vector que representa el módulo de la caída total del transformador. Éste depende de la intensidad de corriente I , de los valores de las resistencias y reactancias del transformador. Cuanto más pequeñas sean éstas menos caída de tensión tendrá el transformador.

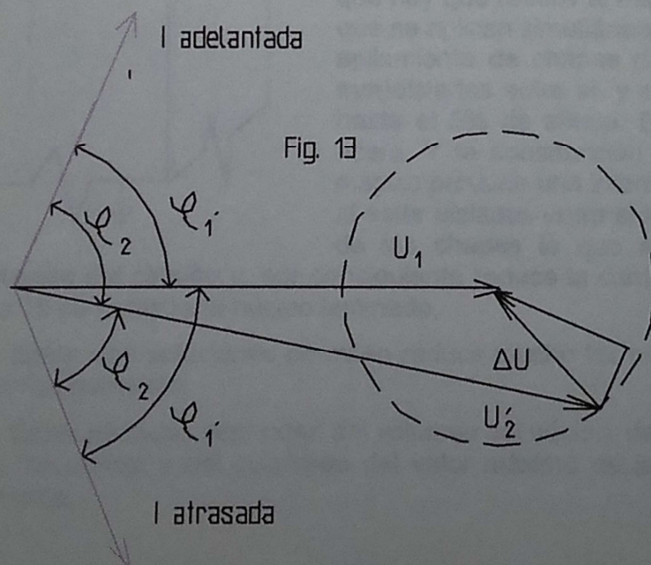
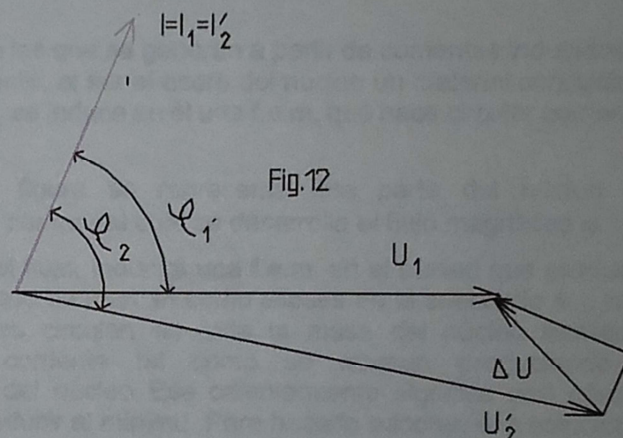
Sin embargo, no sólo el módulo del vector citado define la caída de tensión sino que también interviene su ángulo con respecto a U_1 , que depende del ángulo que tenga I con respecto a la misma tensión, y éste es función del factor de potencia de la carga.



En las figuras 11 y 12 se ven, para la misma caída de tensión total, dos tensiones U_2' diferentes sin que haya cambiado la longitud del vector ΔU que representa la caída de tensión total. Lo único que cambió es el factor de potencia de la carga, que hace variar también el ángulo entre I y U_1 . En la figura 11 la carga es inductiva y en la figura 12 es capacitiva.

La figura 13 muestra cómo variaría la tensión secundaria si el ángulo de la impedancia de carga se modificara.

La circunferencia de trazos de radio igual a ΔU indica las posiciones que podría tomar el extremo de U_2' al variar el factor de potencia de la carga manteniéndose constante la intensidad de corriente I_2' .



Como se ve en la fig 13, las caídas de tensión no sólo reducen la tensión de salida sino que también pueden incrementarla. Esto último —que se llama **efecto Ferranti**— sucede cuando la carga es capacitiva. Esta situación se da muy poco frecuentemente en la práctica pero no es imposible que ocurra. Por lo tanto hay que tenerla en cuenta al analizar el funcionamiento de un transformador. Un

caso en el que se puede dar una carga capacitiva en la práctica es el de una instalación eléctrica en la que se corrige el factor de potencia con capacitores y éstos quedan conectados aunque el resto de las cargas se desconecten.

6.- PÉRDIDAS

Las pérdidas en los transformadores se dividen en:

a) pérdidas magnéticas:

1. pérdidas por corrientes parásitas
2. pérdidas por histéresis

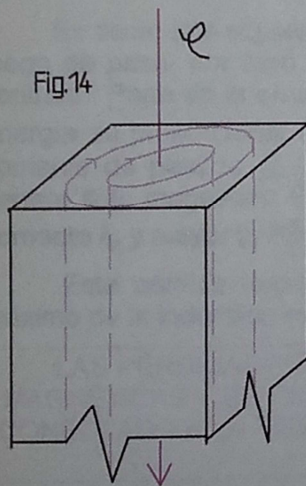
b) pérdidas eléctricas

a) Pérdidas magnéticas

Las pérdidas magnéticas son las que se producen en el núcleo del transformador y se dividen en pérdidas por corrientes parásitas y pérdidas por histéresis.

a) 1. Pérdidas por corrientes parásitas

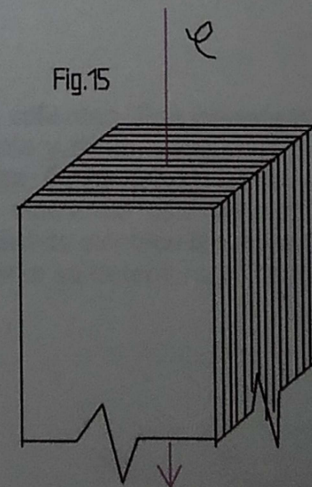
Las pérdidas por corrientes parásitas son las que se generan a partir de corrientes inducidas en el propio núcleo del transformador. Efectivamente, al ser el acero del núcleo un material conductor y estar sometido a un campo magnético variable, se induce en él una f.e.m. que hace circular corrientes tal como lo indica la figura 14.



En esta figura se representa una parte del núcleo del transformador, dentro del cual se desarrolla el flujo magnético ϕ . Al ser alterno el flujo, inducirá una f.e.m. en el núcleo que producirá las corrientes que se marcan como elipses en la superficie superior. Estas corrientes circulan en toda la masa del núcleo formando cilindros de corriente tal como se marcan produciendo el calentamiento del núcleo. Ese calentamiento significa una pérdida que hay que reducir al mínimo. Para hacerlo adoptan dos soluciones que se aplican simultáneamente. Estas son: construir el núcleo como apilamiento de chapas de espesores reducidos (entre 0,35 y 0.5 mm) aisladas entre sí, y el material de estas chapas es acero con hasta el 5% de silicio. Este agregado aumenta la resistividad del acero. Y la construcción con chapas en lugar de hacer el núcleo macizo produce una interrupción del camino de las corrientes ya que al estar aisladas entre sí las corrientes deben circular por el espesor de las chapas lo que aumenta la resistencia del circuito y, por consiguiente reduce la corriente. En la figura 15 se muestra el núcleo laminado.

Estas dos soluciones permiten reducir mucho las pérdidas por corrientes parásitas.

Estas pérdidas dependen del volumen del núcleo, del cuadrado de la frecuencia y del cuadrado del valor máximo de la inducción magnética.



a) 2. Pérdidas por histéresis

Al variar cíclicamente la corriente magnetizante también lo hará el flujo magnético en el núcleo del transformador. Esta variación se producirá siguiendo la curva de la figura 16 que se llama ciclo de histéresis.

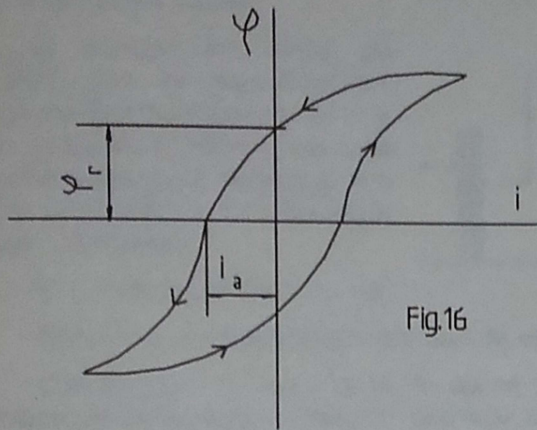


Fig.16

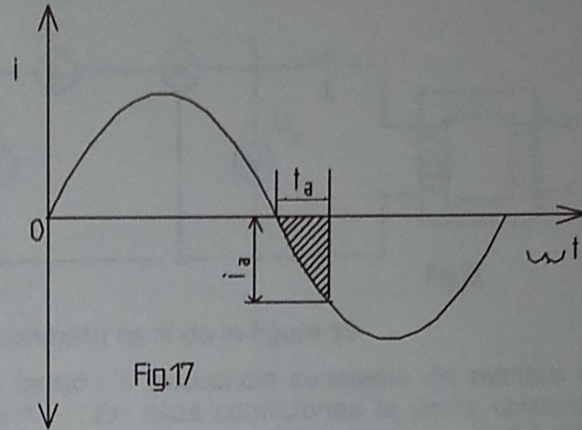


Fig.17

Como se ve en la figura, el flujo no se reduce a cero simultáneamente con la corriente sino que al hacerse cero esta última queda un flujo remanente en el núcleo (ϕ_r). Para hacer cero este flujo remanente hay que aplicarle una corriente de sentido contrario (i_a).

Es decir, que siguiendo la evolución de la corriente en el tiempo - fig.17- al invertirse su sentido, luego de pasar por cero, la corriente no comienza inmediatamente a generar el flujo con sentido contrario. Parte de la energía tomada de la red se debe emplear para desmagnetizar el núcleo. Esa energía es proporcional a i_a . Desde el punto de vista del rendimiento del transformador i_a es una corriente de pérdida ya que durante el tiempo que se emplea en desmagnetizar el núcleo no se genera flujo magnético. Entonces, cuanto más superficie tenga el ciclo de histéresis mayor será la corriente i_a y mayor la PÉRDIDA POR HISTÉRESIS.

Esta pérdida depende del volumen del núcleo, de la frecuencia y del cuadrado del valor máximo de la inducción magnética.

LAS PÉRDIDAS POR CORRIENTES PARÁSITAS Y POR HISTÉRESIS SON PÉRDIDAS MAGNÉTICAS Y SE PRODUCEN SIEMPRE QUE EL PRIMARIO DEL TRANSFORMADOR ESTÉ CONECTADO A LA TENSIÓN, INDEPENDIEMENTE DE SI ESTÁ EN VACÍO O EN CARGA Y SON CONSTANTES.

b) Pérdidas eléctricas

Al circular corriente por los conductores de los bobinados éstos se calientan. Ese calentamiento es una pérdida que depende del cuadrado de la intensidad de corriente y de la resistencia de los conductores. Aparece únicamente cuando el transformador está en carga. Como la resistencia de los conductores varía con la temperatura, la pérdida también lo hará siguiendo esa variación de temperatura. Para el ensayo del transformador en el que se verifica la pérdida eléctrica la temperatura de referencia es de 75° C y conocida la pérdida a la temperatura ambiente se determina a 75° C con la fórmula:

$$P_{75} = P_t \frac{75 + 234,5}{t + 234,5}$$

7.- DETERMINACIÓN DE LAS CONSTANTES DEL TRANSFORMADOR

Para la determinación de las constantes del transformador se hacen dos ensayos que se llaman ENSAYO EN VACÍO y ENSAYO EN CORTOCIRCUITO.

a) Ensayo en vacío

El ensayo en vacío se realiza con el transformador conectado a la tensión nominal y sin carga en el secundario. Las condiciones para realizarlo son que la tensión y la frecuencia sean constantes.

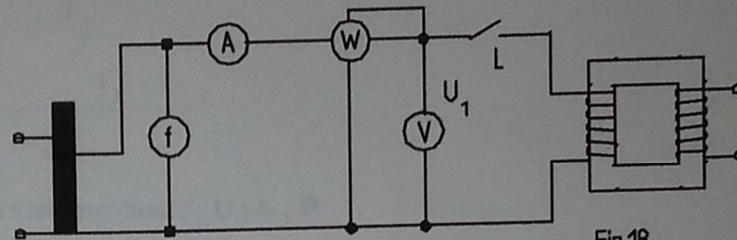


Fig.18

El circuito es el de la fig. 18.

El circuito equivalente aproximado de esta conexión es el de la figura 19

Con la llave "L" abierta se le aplica una tensión a frecuencia constante de manera que el voltímetro indique U_1 - tensión primaria nominal -. En esas condiciones la única corriente que indicará el amperímetro es la que consumen los instrumentos conectados. La corriente I_w es la que toma el vatímetro y la I_v es la del voltímetro. La suma vectorial de ambas es la corriente total. Como el vatímetro y el voltímetro son conductancias, los vectores intensidades están en fase con la tensión; ver figura 20.

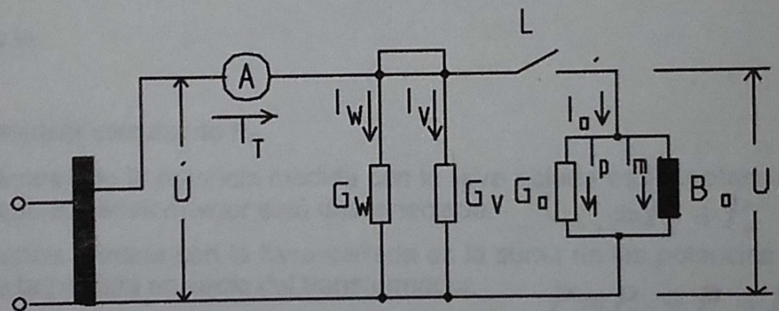


Fig.19

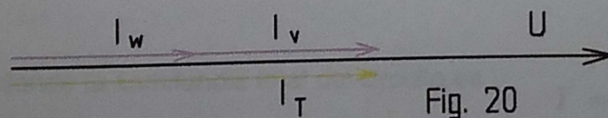


Fig. 20

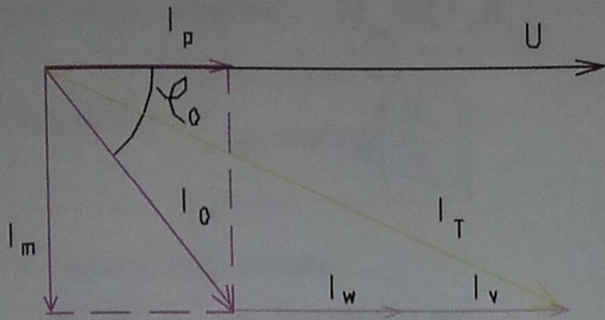
$$I_w = U \cdot G_w$$

$$I_v = U \cdot G_v$$

$$\vec{I}_T = \vec{I}_w + \vec{I}_v$$

Se toman las lecturas de todos los instrumentos: $U ; I_T ; P_1$

A continuación se cierra la llave "L". Esto conecta el transformador a la fuente lo que hace aumentar la intensidad de corriente. Por consiguiente aumentan las caídas de tensión y la tensión aplicada al transformador se reduce. Como el ensayo debe realizarse a tensión constante, hay que elevarla hasta que alcance el valor anterior. Ahora se suma a las corrientes de los instrumentos la que toma el transformador en vacío (I_0) y el diagrama vectorial se transforma en el de la figura 21.



$$I_p = U \cdot G_0$$

$$I_m = U \cdot B_0$$

Fig.21

Se toman las lecturas de los instrumentos: U ; I_T ; P

Con estos valores se pueden calcular los siguientes parámetros del transformador:

P_0 : pérdida en vacío o pérdida magnética

G_0 : conductancia de vacío

B_0 : susceptancia de vacío

I_0 : corriente de vacío

I_m : corriente magnetizante

I_p : corriente de pérdidas

ϕ_0 : ángulo de vacío

Vamos a comenzar calculando P_0 .

Para ello veamos que la potencia medida con la llave abierta es P_i , potencia que consumen los instrumentos ya que el transformador está desconectado.

$$P_i = P_w + P_v$$

Y que la potencia medida con la llave cerrada es la suma de las potencias consumidas por los instrumentos más la pérdida en vacío del transformador.

$$P = P_w + P_v + P_0$$

Por lo tanto: $P_0 = P - P_i$, Y $P_0 = U^2 \cdot G_0$ entonces

$$G_0 = \frac{P_0}{U^2}$$

De donde la admitancia total del circuito es :

$$Y = \sqrt{(G_w + G_v + G_0)^2 + B^2_0} = \frac{I_T}{U}$$

$$Y = P = U^2 \cdot (G_w + G_v + G_0)$$

Despejando $(G_w + G_v + G_0)$ y reemplazando en la expresión de la admitancia total:

$$Y = \sqrt{\left(\frac{P}{U^2}\right)^2 + B^2_0} = \frac{I_T}{U}$$

$$B_0 = \sqrt{\left(\frac{I_T}{U}\right)^2 - \left(\frac{P}{U^2}\right)^2}$$

Calculamos las corrientes:

$$I_m = U \cdot B_0$$

$$I_p = U \cdot G_0$$

$$I_0 = \sqrt{I_m^2 + I_p^2}$$

Y el ángulo φ_0 :

$$\varphi_0 = \arctg\left(\frac{B_0}{G_0}\right)$$

b) Ensayo en cortocircuito

El ensayo se realiza poniendo en cortocircuito el secundario del transformador y alimentando el primario con una tensión que haga circular la corriente nominal. La condición a cumplir es que la corriente y la frecuencia sean constantes.

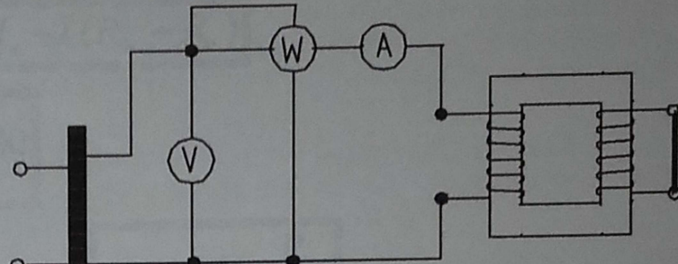


Fig.22

La figura 23 muestra el circuito equivalente al anterior

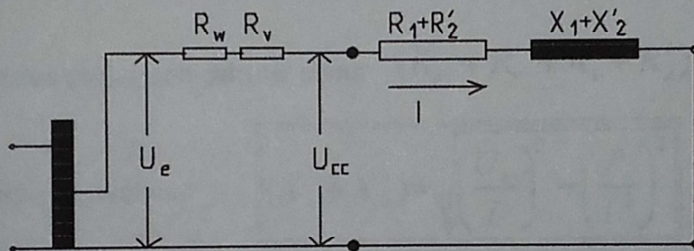


Fig.23

Se le aplica al circuito una tensión U_e tal que haga circular la corriente nominal del bobinado elegido como primario. La frecuencia debe ser constante.

Se toman las lecturas de los instrumentos: U_e ; I ; P .

Con estos valores se calcularán:

P_{cc} : pérdida en carga o pérdida eléctrica

U_{cc} : tensión de cortocircuito

$U_{cc}\%$: tensión porcentual de cortocircuito

$R_1 + R'_2$: resistencia equivalente del transformador

$X_1 + X'_2$: reactancia equivalente del transformador

I_{cc} : corriente de cortocircuito

φ_{cc} : ángulo de cortocircuito

Cuando circula la corriente por el circuito produce caídas de tensión en las bobinas amperimétricas de los instrumentos. Estas caídas de tensión pueden calcularse como $I \cdot (R_w + R_v)$. Además en las mismas resistencias se disipa potencia que es $I^2 \cdot (R_w + R_v)$. Por esto es necesario conocer las resistencias internas de los instrumentos.

Comenzamos calculando la pérdida eléctrica:

La potencia medida por el vatímetro es: $P = P_w + P_v + P_{cc}$

De donde se despeja P_{cc} :
$$P_{cc} = P - P_w - P_v$$

La tensión de cortocircuito es:
$$U_{cc} = U_e - I(R_w + R_v)$$

La tensión porcentual:
$$u_{cc\%} = \frac{U_{cc}}{U_1} \cdot 100$$

La resistencia equivalente del transformador:
$$(R_1 + R_2') = \frac{P_{cc}}{I^2}$$

La impedancia total es:
$$Z = \sqrt{(R_w + R_v + R_1 + R_2')^2 + (X_1 + X_2')^2} = \frac{U_e}{I}$$

Las resistencias se pueden calcular como:
$$(R_w + R_v + R_1 + R_2') = \frac{P}{I^2}$$

Y la reactancia equivalente:
$$(X_1 + X_2') = \sqrt{\left(\frac{U_e}{I}\right)^2 - \left(\frac{P}{I^2}\right)^2}$$

La corriente de cortocircuito se encuentra a través de la relación entre las tensiones nominal y de cortocircuito:
$$I_{cc} = I \cdot \frac{U_1}{U_{cc}}$$

El ángulo de cortocircuito es:
$$\varphi_{cc} = \arctg \frac{X_1 + X_2'}{R_1 + R_2'}$$

8.- RENDIMIENTO

Como en toda máquina o todo sistema, el rendimiento se define como la relación entre la potencia entregada y la recibida. En el transformador sería – expresado en porciento –.

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} \cdot 100$$

Y si reemplazamos el valor de la potencia primaria o secundaria en función de las pérdidas el rendimiento es:

$$\eta = \frac{P_1 - \text{pérdidas}}{P_1} \cdot 100 = 1 - \frac{\text{pérdidas}}{P_1} \quad \text{o} \quad \eta = \frac{P_2}{P_2 + \text{pérdidas}} \cdot 100$$

9.- RENDIMIENTO CÍCLICO

El rendimiento cíclico es la relación entre la energía de salida y la de entrada en un ciclo de trabajo. De acuerdo al tipo de máquina o instalación el ciclo de trabajo se toma de diferentes duraciones, siendo los más comunes los ciclos diarios y anuales.

Las pérdidas de un transformador se reducen lo más posible, siempre haciendo un balance entre el aumento del rendimiento y el costo adicional que esto genera, pero ya determinado el porcentaje de pérdidas, queda aún la posibilidad de distribuir ese porcentaje entre las pérdidas magnéticas y eléctricas. Esta división de las pérdidas tiene gran importancia a la hora de determinar el rendimiento cíclico. Efectivamente, en un transformador que va a estar permanentemente conectado a la red y cuya carga va a ser muy variable, -como ocurre con los **transformadores de distribución**- conviene reducir al mínimo las pérdidas magnéticas ya que estas son constantes y no dependen de la corriente de carga.

Se ve entonces que para un correcto aprovechamiento de un transformador es necesario conocer no sólo el rendimiento en potencia sino que también es fundamental conocer el régimen con el cual va a trabajar para definir el rendimiento cíclico.

La figura 24 muestra dos casos diferentes de curva de carga de un transformador, para los cuales deben dimensionarse de manera diferente las pérdidas magnéticas y eléctricas.

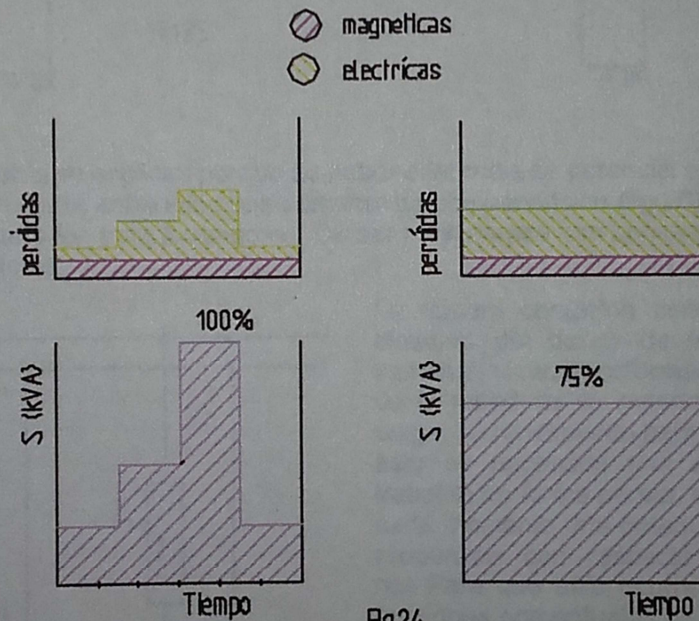


Fig.24

En el primer caso, como es poco el tiempo que trabaja con potencias altas, conviene reducir al mínimo la pérdida magnética ya que esta última es constante.

En el segundo caso debe reducirse al mínimo la pérdida eléctrica porque la carga es alta y permanente.

10.- CONEXIÓN EN PARALELO DE TRANSFORMADORES MONOFÁSICOS

Conectar en paralelo transformadores significa conectar sus primarios a una línea común y sus secundarios a otra línea también común (figura 25).

Para que dos o más transformadores puedan ser conectados en paralelo deben cumplir algunas condiciones que son las siguientes:

- Igualdad de relación de transformación
- Igualdad de tensiones primarias
- Igualdad de tensiones porcentuales de cortocircuito

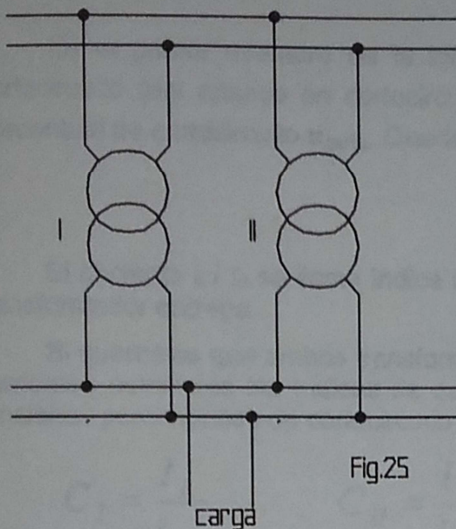


Fig.25

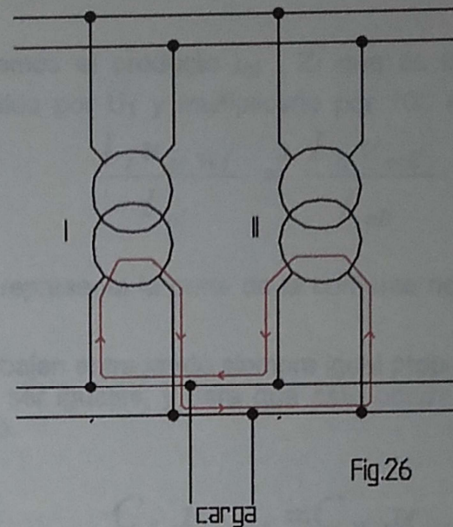


Fig.26

Las dos primeras se explican porque de haber diferencia de potencial en los secundarios de los transformadores circularía entre ellos una corriente de compensación (fig.26) que, en el mejor de los casos, sobrecalentaría los transformadores. De ser muy intensa esa corriente, podría destruir uno o ambos transformadores.

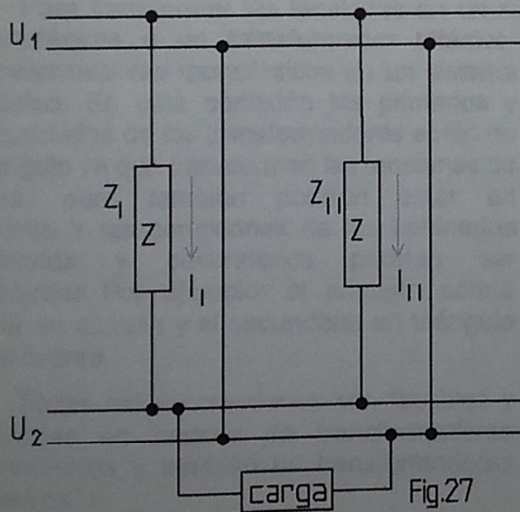


Fig.27

La tercera condición tiene que ver con el rendimiento del banco de transformadores. Efectivamente, si un transformador se carga con menos de la mitad de su potencia nominal o se sobrecarga, su rendimiento baja considerablemente. Por esto es necesario que ambos transformadores trabajen en forma pareja, entregando cada uno en cada momento una potencia que guarde la misma proporción con respecto a su potencia nominal. Para que esto ocurra deben ser iguales sus tensiones porcentuales de cortocircuito. A partir de la fig.27 vamos a analizar esta condición.

En esta figura vemos los circuitos equivalentes aproximados de dos transformadores conectados en paralelo. Ambos transformadores están alimentando una carga que toma una intensidad de corriente.

Para el análisis vamos a considerar que los transformadores cumplen con las dos primeras condiciones de paralelo. Por lo tanto las tensiones primarias de ambos son iguales entre sí y también lo son las tensiones secundarias.

De ahí podemos deducir que las caídas de tensión de ambos transformadores también son iguales entre sí.

Entonces podemos escribir: $I_I \cdot Z_I = I_{II} \cdot Z_{II}$

Si multiplicamos y dividimos el primer miembro por I_{nI} , el segundo por I_{nII} , dividimos ambos por U_1 y los multiplicamos por 100 la igualdad no cambia

$$\frac{I_I \cdot I_{nI} \cdot Z_I}{U_1 \cdot I_{nI}} \cdot 100 = \frac{I_{II} \cdot I_{nII} \cdot Z_{II}}{U_1 \cdot I_{nII}} \cdot 100$$

En el primer miembro de la igualdad tenemos el producto $I_{nI} \cdot Z_I$ que es la tensión de cortocircuito (del ensayo en cortocircuito) y dividido por U_1 y multiplicado por 100 es la tensión porcentual de cortocircuito $u_{cc\%}$. Queda entonces:

$$\frac{I_I u_{cc\%I}}{I_{nI}} = \frac{I_{II} u_{cc\%II}}{I_{nII}}$$

El cociente I_I / I_{nI} se llama índice de carga y representa la parte de la corriente nominal que el transformador entrega.

Si queremos que ambos transformadores trabajen entregando siempre igual proporción de sus corrientes nominales los índices de carga deben ser iguales, y para que esto ocurra también las tensiones porcentuales de cortocircuito deben serlo.

$$C_I = \frac{I_I}{I_{nI}} \quad C_{II} = \frac{I_{II}}{I_{nII}} \quad C_I \cdot u_{cc\%I} = C_{II} \cdot u_{cc\%II}$$

Para que $C_I = C_{II}$ debe ser $u_{cc\%I} = u_{cc\%II}$

B.- TRANSFORMADOR TRIFÁSICO

Para transformar las tensiones en un sistema trifásico se pueden utilizar tres transformadores monofásicos o un transformador trifásico. En la figura 28 se muestra la conexión de tres transformadores monofásicos en un sistema trifásico. En esta conexión los primarios y secundarios de los transformadores están en triángulo ya que transforman las tensiones de línea, pero también podrían estar en estrella. Y las conexiones de los bobinados primarios y secundarios podrían ser diferentes. Por ejemplo: el primario podría estar en estrella y el secundario en triángulo o viceversa.

Todas estas conexiones son factibles y utilizadas en bancos de transformadores monofásicos y también en transformadores trifásicos.

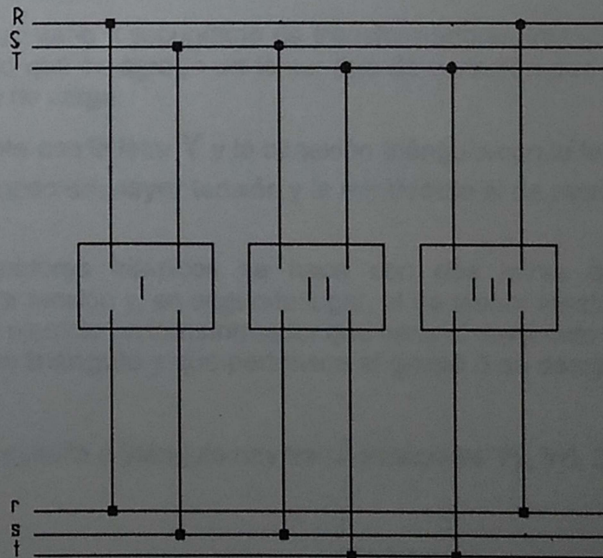


Fig.28

Los transformadores trifásicos pequeños y medianos tienen un núcleo de tres columnas en las que se arrollan los bobinados correspondientes a cada una de las fases (fig.29). en las columnas I, II, III se arrollan los bobinados de las fases R, S, T. La apariencia en perspectiva es la de la figura 30.

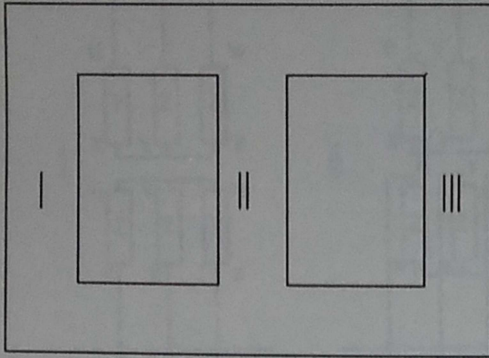


Fig.29

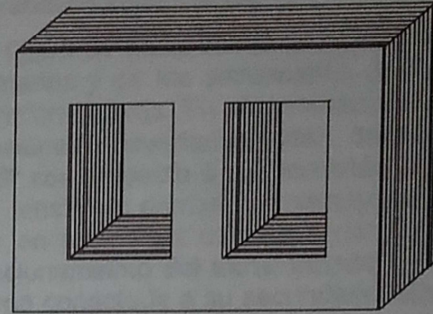


Fig.30

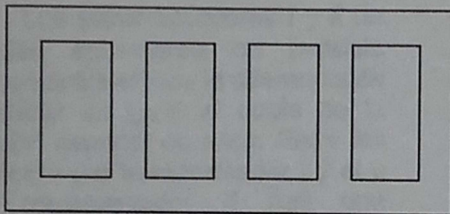


Fig.31

En transformadores muy grandes, donde debe reducirse al mínimo las pérdidas, se utiliza el núcleo de cinco columnas o acorazado como el de la fig 31, que reduce las pérdidas por flujo disperso. En el núcleo se utilizan las tres columnas centrales para los bobinados y las dos exteriores proveen un blindaje magnético.

Como los transformadores trifásicos tienen tres conjuntos de bobinados iguales, que trabajan como tres transformadores monofásicos, los diagramas

vectoriales de cada uno de ellos son similares a los de transformadores monofásicos. Lo mismo sucede con los circuitos equivalentes.

1.- CONEXIÓN DE TRANSFORMADORES TRIFÁSICOS

Como ya se dijo más arriba, los bobinados primario y secundario de transformadores trifásicos pueden conectarse en estrella y en triángulo, a lo que se agrega un tercer tipo de conexión que se llama **zig-zag**, utilizado en situaciones especiales de carga.

La conexión estrella se representa literalmente con la letra **Y** y la conexión triángulo con la letra **D**; en ambos casos la **mayúscula** indica el devanado de **mayor** tensión y la **minúscula** el de **menor** tensión.

La designación normalizada de transformadores trifásicos se hace con dos letras que representan en primer lugar el devanado de mayor tensión y, en segundo lugar, el de menor tensión, y un número que indica el grupo de conexión. Por ejemplo un transformador que tiene el devanado de mayor tensión en **estrella**, el de menor tensión en **triángulo** y que pertenece al **grupo 5** se designa con: **Yd5**.

Como los devanados se pueden conectar en estrella o triángulo hay transformadores **Yy, Yd, Dd, Dy**. También los hay **Yz, Dz**.

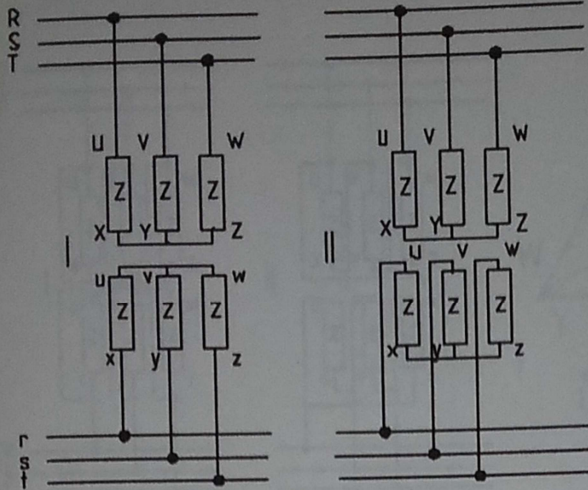


Fig.32

Tomemos como ejemplo la conexión Yy. En la fig 32 se ven dos posibilidades de conexión. La diferencia entre ambas conexiones está en la polaridad de los devanados secundarios.

La figura 33 muestra las tensiones de los primarios y de los secundarios de ambos transformadores. En el transformador I las tensiones secundarias están desfasadas 180° con respecto a las primarias. En el II las tensiones primarias y secundarias están en fase. Esta diferencia no afecta el funcionamiento del transformador ni de la carga conectada a su secundario. Sin embargo es fundamental a la hora de conectar transformadores trifásicos en paralelo.

Los transformadores I y II no pueden conectarse en paralelo porque entre ambos la diferencia de potencial es igual al doble de la tensión nominal de ellos. Entre los puntos x del transformador I y el u del transformador II hay una diferencia de potencial igual a la tensión $UX_I + XU_{II}$.

Por lo anterior vemos que es fundamental conocer cómo están conectados los transformadores trifásicos a efectos de saber si se pueden o no conectar en paralelo.

Para ello se agrupan los transformadores trifásicos según el ángulo de desfase entre las tensiones primarias y secundarias.

Esto resulta en cuatro grupos normalizados que se identifican con números. Estos números indican el múltiplo de 30 grados correspondiente al ángulo de desfase.

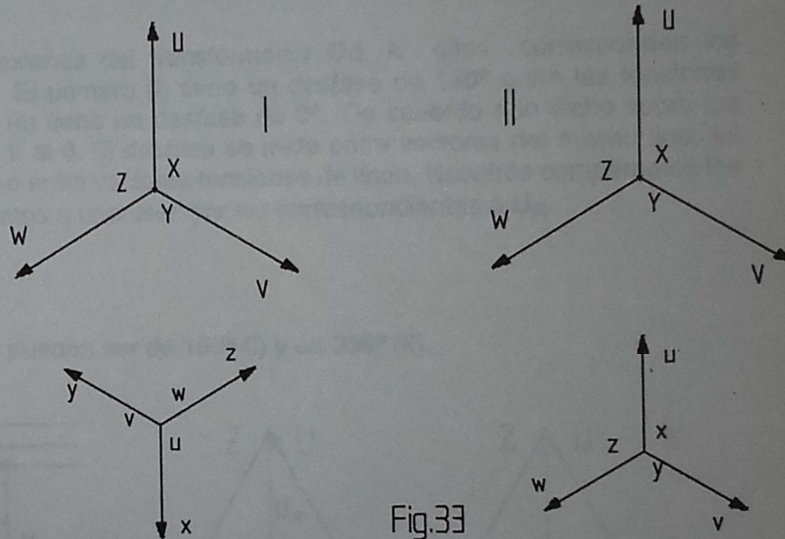


Fig.33

Los **GRUPOS DE CONEXIÓN** son:

0	5	6	11
Yy	Yd	Yy	Yd
Dd	Dy	Dd	Dy
Dz	Yz	Dz	Yz

Por ejemplo, el grupo 5 reúne a los transformadores que tienen un desfase de 150° entre tensiones primarias y secundarias.

Vamos a analizar cada una de estas conexiones.

La conexión Yy ya la vimos más arriba como ejemplo. Veremos ahora la conexión Dd

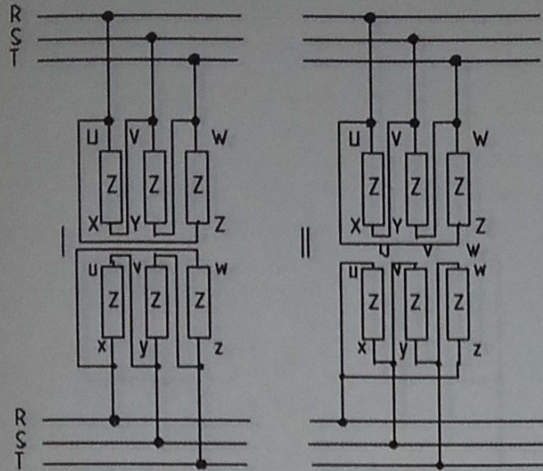


Fig.34

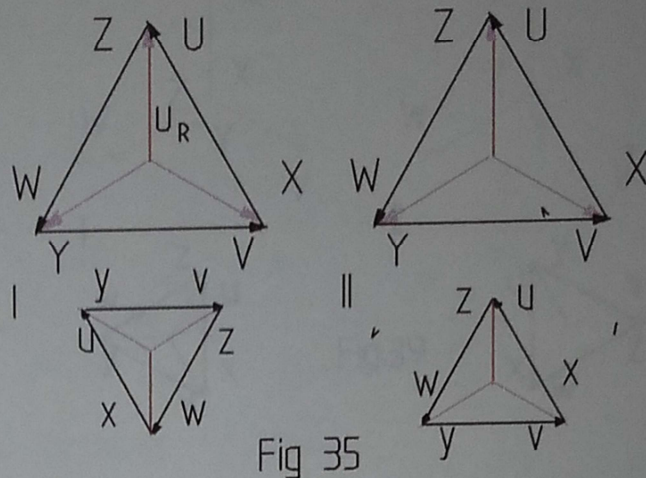


Fig 35

La figura 34 muestra dos conexiones del transformador Dd. A ellas corresponden los diagramas de tensiones de la fig. 35. El primero (I) tiene un desfase de 180° entre las tensiones primarias y secundarias y el segundo (II) tiene un desfase de 0° . De acuerdo a lo dicho sobre los grupos, el I pertenece al grupo 6 y el II al 0. El desfase se mide entre vectores del mismo tipo, es decir, entre vectores tensiones de fase o entre vectores tensiones de línea. Nosotros comparamos los vectores tensión de fase y para ello vamos a usar siempre los correspondientes a U_R .

Tomemos la conexión Dy

La figura 37 muestra que los desfases pueden ser de 150° (I) y de 330° (II).

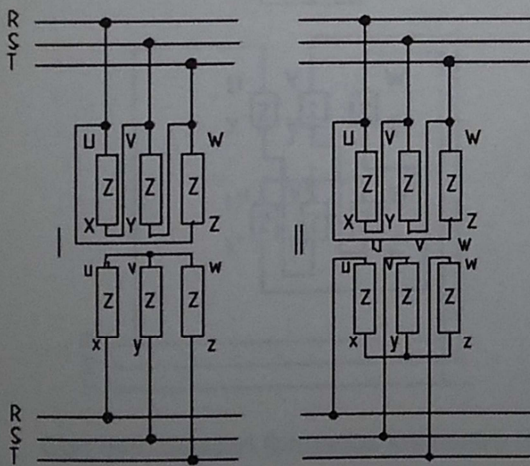


Fig.36

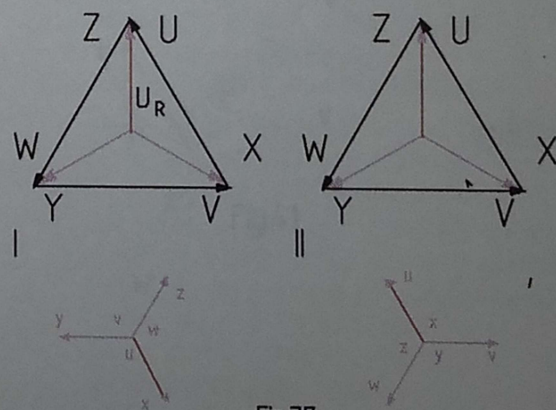


Fig.37

En un transformador Yd los desfases también pueden ser de 150° y de 330° . Se muestran en las figuras 38 y 39. El transformador I tiene 150° de desfase y el II tiene 330° .

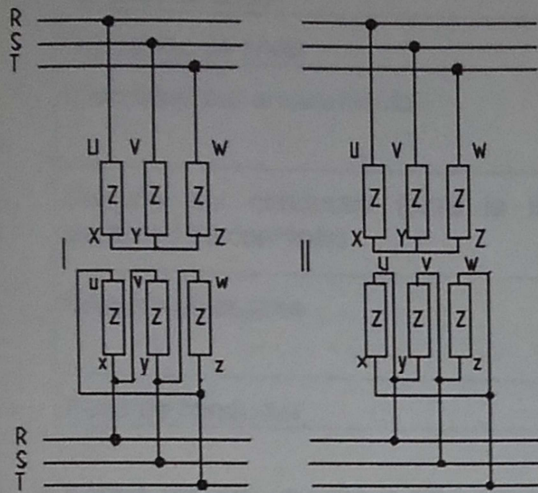


Fig.38

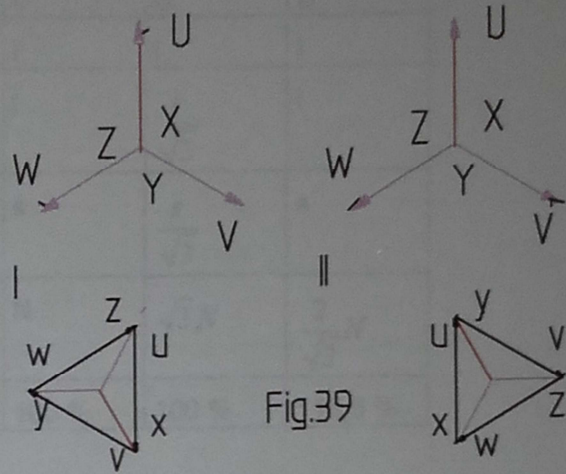


Fig.39

Otra posible conexión de transformadores trifásicos es la que se llama **zig-zag** y que consiste en dividir en dos partes iguales un devanado (el de menor tensión), formar una estrella con una mitad de cada fase y conectar, en serie, las otras mitades invertidas de las fases adyacentes en una cierta secuencia. Una posibilidad de conexión se muestra en la figura 40. La figura 41 muestra los desfases que corresponden a un transformador **Yz11**.

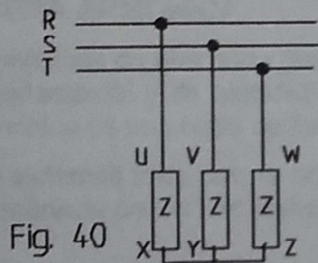


Fig. 40

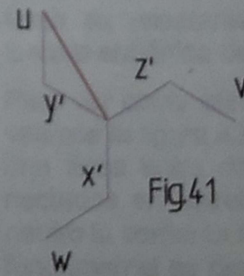
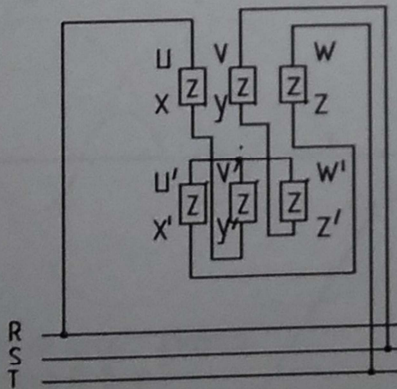
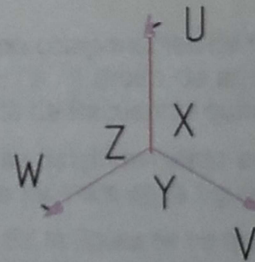


Fig41

Con esto quedan formados los cuatro grupos de conexión de transformadores trifásicos que se utilizan en la práctica.

2.- RESUMEN DE PROPIEDADES DE LAS CONEXIONES TRIFÁSICAS

Para transformadores de la misma potencia con iguales tensiones se tiene:

	Estrella	Triángulo	Zigzag
Tensión de línea	U	U	U
Intensidad de línea	I	I	I
Intensidad por arrollamiento	I	$\frac{I}{\sqrt{3}}$	I
Sección del conductor (para la misma densidad de corriente)	s	$\frac{s}{\sqrt{3}}$	s
Número de espiras	N	$\sqrt{3}N$	$\frac{2}{\sqrt{3}}N$
Peso de conductor	100 %	100 %	115,5 %

3.- CAMPO DE APLICACIÓN DE LAS CONEXIONES TRIFÁSICAS

La conexión estrella se utiliza cuando es necesario disponer de neutro, ya sea en redes de baja tensión para distribuir trifásica y monofásica y en alta tensión para conectar el neutro a tierra.

La conexión triángulo se utiliza mayormente como primario de transformadores elevadores en centrales generadoras. También se utiliza en primario de transformadores de distribución

4.- TERCERA ARMÓNICA

Las armónicas de una onda (llamada fundamental) son componentes de frecuencias múltiplo de la onda fundamental y de amplitud decreciente al aumentar el orden de armónica. Por ejemplo la tercera armónica es una onda de frecuencia triple, la quinta de frecuencia quintuple, etc.

En los sistemas trifásicos, la armónica que perturba su funcionamiento es la tercera porque las terceras armónicas de las tres fases se suman tal como se muestra en la figura 42.

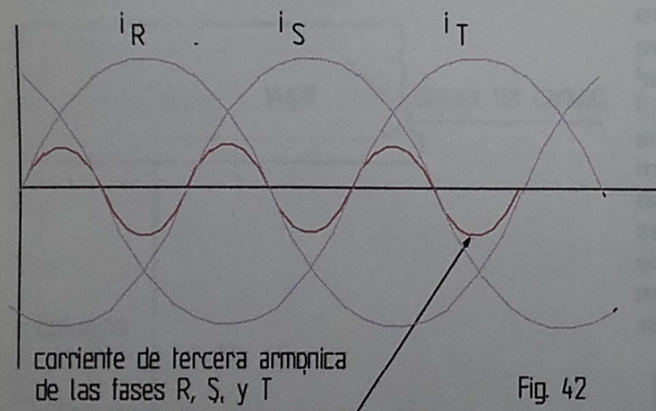


Fig. 42

La suma de las corrientes de frecuencia fundamental es cero porque están desfasadas 120° , mientras que las de tercera armónica están en fase.

Este efecto produce sobrecalentamiento en las líneas y en los mismos transformadores porque es una corriente adicional a la corriente normal de funcionamiento. Por lo tanto reduce el rendimiento.

En la figura se ve que las tres corrientes de tercera armónica están en fase y por lo tanto su resultante es una corriente de tercera armónica de amplitud triple.

Para ver como afecta a una línea trifásica veamos la figura 43. En esta se representa una línea entre dos transformadores conectados en estrella y se ve que por el neutro la corriente resultante de frecuencia fundamental es cero, mientras que la corriente de tercera armónica no lo es. Esta es la suma de las corrientes de tercera armónica de cada fase.

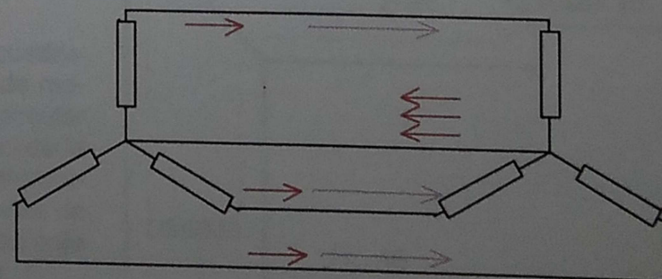


Fig. 43

Además, como tiene frecuencia triple que la fundamental, que es de 50 Hz, su frecuencia es de 150 Hz. Esta es una frecuencia que está dentro de las audibles por el ser humano. Si la línea de media tensión pasa cerca de una línea telefónica, se inducirá en esta última un zumbido de 150 Hz que producirá interferencia en la comunicación.

Estos inconvenientes se eliminan no conectando a tierra simultáneamente los dos centros de estrella de los transformadores. Otra solución es utilizar en uno de los transformadores la conexión triángulo. Esta conexión "cortocircuita" las corrientes de tercera armónica tal como se ve en la figura 44, sin circular por las líneas.

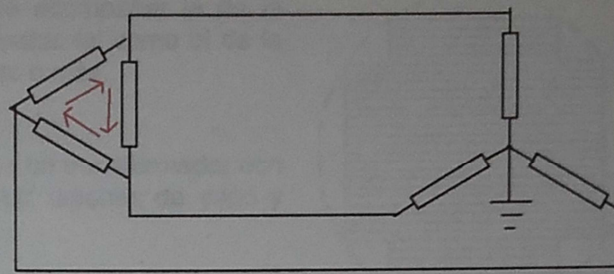


Fig. 44

5.- CARACTERÍSTICAS CONSTRUCTIVAS

a) Núcleo

El núcleo de los transformadores se construye de chapas de acero silicio tal como se vio cuando se trató el tema de las pérdidas magnéticas. En transformadores de mediana y alta potencia se utiliza también el acero de grano orientado que es un acero cuyo último proceso de laminación se realiza en frío. Este laminado en frío produce una orientación previa de los imanes elementales del acero mejorando la permeabilidad en la dirección de laminación, aumentando su rendimiento.

Los núcleos son de tres o de cinco columnas, dependiendo de la potencia del transformador. Los núcleos de cinco columnas o acorazados reducen la dispersión del campo magnético aumentando el rendimiento. En transformadores de pequeña o mediana potencia se utilizan núcleos de tres columnas por ser más económicos, pequeños y livianos.

Los núcleos se construyen ensamblando las columnas y los yugos de manera de reducir al mínimo las pérdidas. Para ello se utilizan técnicas de montaje que dependen de la potencia del transformador.

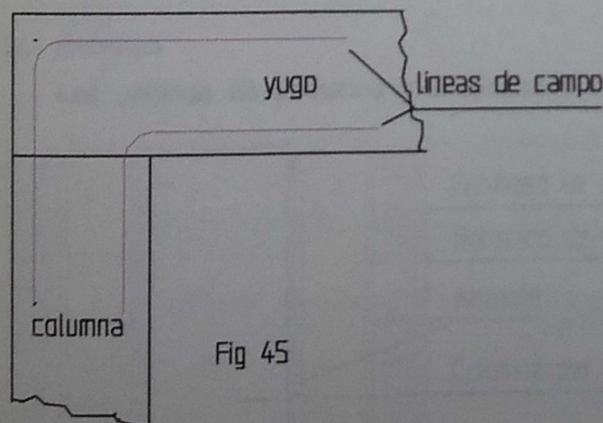


Fig 45

ciendo casi a cero el camino transversal.

La sección de las columnas puede ser cuadrada pero generalmente en transformadores de mediana y alta potencia se tiende a la sección circular para mejorar la eficiencia y reducir el tamaño de la máquina. Efectivamente, en el caso de transformadores de potencias medias y altas las secciones de los conductores son grandes y es más conveniente que las bobinas se hagan con forma circular.

En transformadores de mediana y alta potencia las uniones entre los yugos y las columnas se hacen a 45°. Esto se explica en las figuras 45 y 46. En la primera de ellas se ve que el campo magnético se establece transversalmente a la dirección de la laminación del acero de grano orientado en todas las uniones si éstas se hacen a 90°, reduciendo el rendimiento porque en esa dirección la permeabilidad disminuye mucho. Para evitar esto las columnas y yugos se unen a 45° tal como se ve en la fig.46, redu-

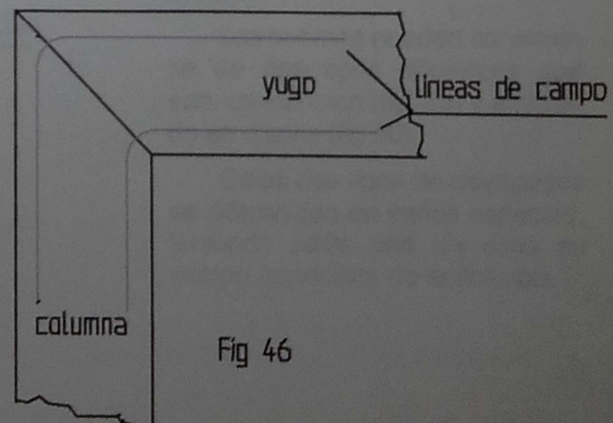


Fig 46

Por lo tanto la forma del núcleo debe acompañar la de la bobina. Esto se logra con núcleos escalonados tal como el de la figura 47, con escalones que pueden ser tres o más.

En la figura 48 se muestra un detalle de un transformador con núcleo escalonado (13 escalones) y con las uniones de yugo y columnas a 45°.

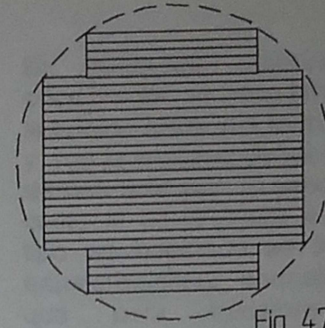


Fig 47

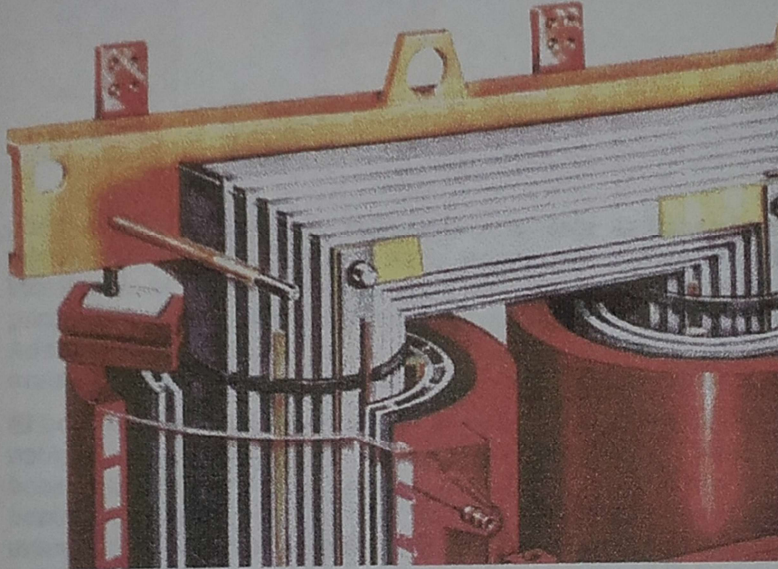


Fig. 48

Este detalle se obtuvo de un folleto de ESTABLECIMIENTOS MIRON S.A.I.C.I.F.A.

b) Bobinas

Las bobinas de primarios y secundarios se hacen con alambre de sección circular o con planchuela de sección rectangular. Esto depende de la intensidad de corriente de los bobinados. Si ésta es muy grande, la sección necesaria también lo será y en ese caso es más manejable la planchuela ya que resulta más fácil de enrollar.

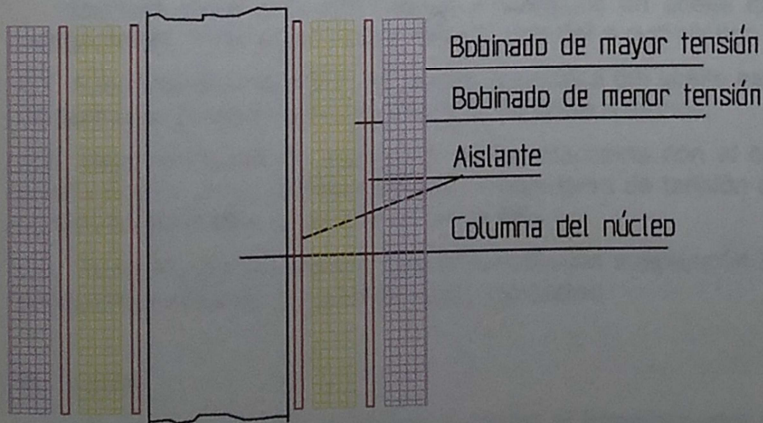


Fig.49

Las bobinas pueden construirse de dos tipos diferentes que son: concéntrico (fig. 49) y alternado en discos (fig 50).

Estos dos tipos de devanados se diferencian en varios aspectos, teniendo cada uno de ellos su campo específico de aplicación.

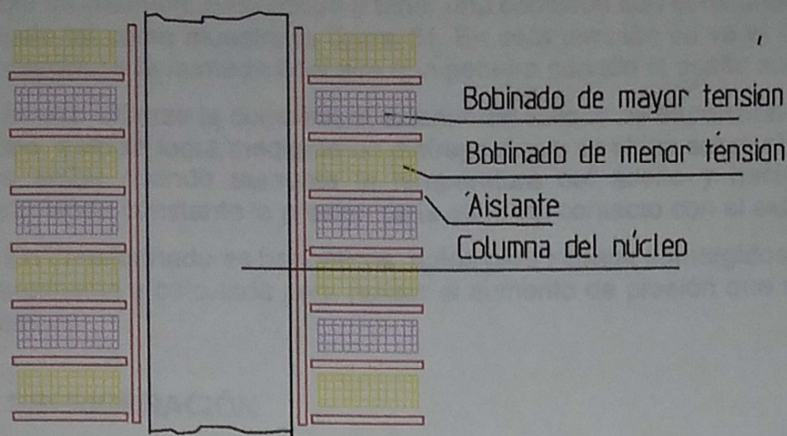


Fig.50

El bobinado cilíndrico o concéntrico se hace arrollando la bobina sobre una forma única y con la totalidad de las vueltas de una sola vez. El aspecto es como el de la figura 49. Este tipo de bobinado se limita a transformadores pequeños ya que para transformadores mayores el tamaño y peso son muy grandes y eso hace que sea difícil de manejar. A esto se suma el hecho de que ante una sobretensión de maniobra o atmosférica que se produzca en la línea que llega al transformador, aunque reducida

por los descargadores de sobretensiones, ésta se transmite a la primera parte del bobinado del transformador, pudiendo ocasionar daños por perforación del aislante. Para prevenir esto se incrementa el espesor de aislante en las primeras vueltas de los bobinados. En este tipo de bobinado para llevar a cabo esta protección hay que interrumpir el bobinado para agregar el aislante adicional. Además la reparación de un desperfecto en el bobinado obliga a desarmar totalmente el transformador y, eventualmente, rebobinar totalmente el devanado.

El bobinado alternado en discos se hace fraccionando el número total de vueltas en un número de bobinas que se ubican como en la figura 50 y se conectan en serie. En este caso el tiempo de bobinado se reduce en proporción a la cantidad de bobinas parciales que se hagan ya que estas se bobinan simultáneamente. Además el peso y tamaño de estas bobinas parciales o discos las hacen manejables. Hay que tener en cuenta también la ventaja de poder sobreaislar una o dos bobinas sin interrumpir el bobinado. Si llegase a fallar un devanado se reemplaza únicamente la bobina parcial que falló, reduciendo el tiempo y costo de la reparación. Al alternarse las bobinas de primario y secundario la distribución del flujo magnético en ambos devanados es más homogénea. Este tipo de devanado se utiliza en transformadores medianos y grandes.

c) Aceite

Muchos transformadores están sumergidos en aceite que cumple dos funciones: aislación y refrigeración. Esta es un aceite mineral que debe cumplir con ciertos requisitos que son:

- c)1. Ausencia de humedad. La rigidez dieléctrica del aceite es de **200 kV/cm**. Pequeños porcentajes de humedad pueden reducirla a la décima parte o menos.
- c)2. Bajo contenido de azufre. El azufre reacciona con el cobre formando una capa aislante que puede afectar a los contactos de los reguladores de tensión que formen parte del transformador. El contenido aceptable de azufre es del **0,2%**.
- c)3. Ausencia de impurezas. Las impurezas en suspensión hacen descender el valor de la rigidez dieléctrica y colaboran en la formación de barros.

d) Cuba

La cuba es el recipiente que contiene al transformador y al aceite. Es de chapa de acero. La construcción de la cuba depende del tipo de refrigeración que utilice el transformador. Esta puede ser lisa, aletada, con tubos o con radiadores. Como va cerrada herméticamente, tiene un tanque de expansión para evitar que el calentamiento del aceite eleve peligrosamente la presión en su interior. Este tanque de expansión puede tener diversas características que dependen de las condiciones en que trabajará el transformador.

Para mantener constante la presión el tanque permite que al calentarse y al enfriarse el aceite cambie su volumen. Esto obliga a tener una conexión con el exterior, materializada mediante un tubo acodado tal como muestra la figura 51. En ésta también se ve el filtro y el recipiente con "silicagel" que disminuye la humedad del aire que penetra cuando el aceite se enfría.

Puede evitarse la conexión al exterior del tanque de expansión para eliminar el ingreso de aire a la cuba. Esto se logra mediante un diafragma que se ubica sobre el nivel del aceite y que se deforma hacia arriba cuando aumenta la temperatura del aceite y hacia abajo cuando ésta se enfría, manteniendo constante la presión de la cuba sin contacto con el exterior, ver figura 52.

En transformadores herméticos, aptos para trabajar sumergidos, la cuba es hermética, sin tanque de expansión y calculada para resistir el aumento de presión que se produce cuando se calienta el aceite.

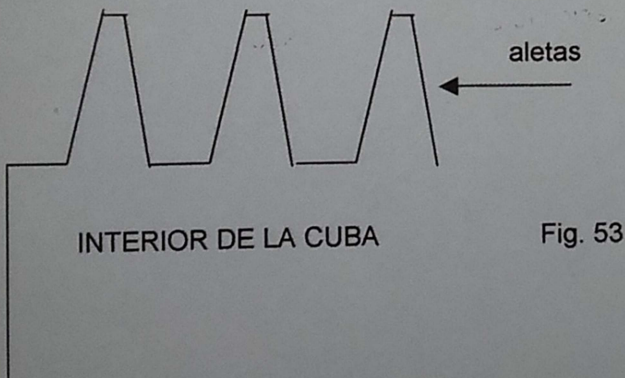
6.- REFRIGERACIÓN.

Cuando el transformador funciona, las pérdidas generan calor. Este calor, si no es evacuado adecuadamente, produce una elevación de temperatura que puede deteriorar irreversiblemente los materiales aislantes. Para evitar esto, se emplean métodos y dispositivos que limitan la temperatura a valores no peligrosos para la integridad del transformador. Estos métodos y dispositivos son los que se estudian a continuación.

a) Refrigeración por circulación natural de aceite y de aire

La refrigeración se produce mediante la circulación del aceite que está en contacto con los bobinados y el núcleo del transformador, de los cuales absorbe el calor y lo transfiere al exterior por termosifón.

- a) 1.- **Cuba lisa:** cuando la superficie de la cuba es suficiente para transmitir el calor a la adecuada velocidad, se utiliza sin ningún tipo de agregado.
- a) 2.- **Cuba aletada:** si la superficie de la cuba no es la adecuada puede incrementarse mediante aletas tales como las de la figura 53. Estas aletas permiten la circulación del aceite por su interior.



- a) 3.- **Cuba con tubos:** se puede aumentar la superficie de intercambio de calor rodeando la cuba de tubos conectados con ella como muestra la figura 54.
- a) 4.- **Cuba con radiadores:** se puede incrementar aún más la superficie de intercambio de calor dotando a la cuba de radiadores por los que circule el aceite (fig 55).

b) Refrigeración por circulación natural de aceite y forzada de aire

En este caso se dispone de radiadores en los cuales se fuerza la circulación de aire mediante ventiladores que se colocan en la parte inferior de los radiadores (fig. 56).

c) Refrigeración por circulación forzada de aceite y aire

Si los medios mencionados anteriormente no son suficientes para una correcta evacuación del calor generado por las pérdidas del transformador, puede forzarse la circulación de aceite mediante una bomba que la impulse dentro de los radiadores, aumentando así su velocidad de circulación y la evacuación del calor. También en este caso los radiadores cuentan con ventiladores que fuerzan la circulación de aire.

d) Refrigeración por agua

En transformadores muy grandes o en aquellos que trabajan en zonas de temperaturas muy altas puede ser necesario refrigerar el aceite con un intercambiador de calor aceite-agua. Para ello se coloca una serpentina dentro del transformador, por la que circula agua que posteriormente se refrigera a través de, por ejemplo, una torre de enfriamiento.

Con esto se resumen los métodos utilizados para la refrigeración de transformadores. Los diferentes tipos de refrigeración se designan con siglas normalizadas que se forman con las iniciales de las palabras **O**il (aceite), **A**ir (aire), **N**atural, **F**orced (forzado) y **W**ater (agua) y son:

- ONAN —————> Circulación natural de aceite y aire
- ONAF —————> Circulación natural de aceite y forzada de aire
- OFAF —————> Circulación forzada de aceite y aire
- OFWF —————> Circulación forzada de aceite y agua