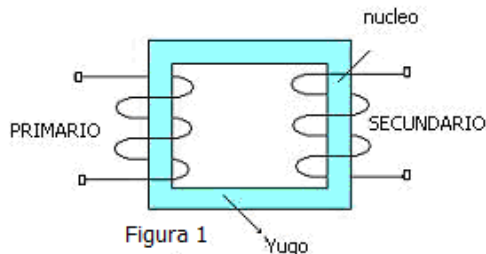


Concepto básico

En forma elemental, un transformador está constituido por dos circuitos eléctricos, concatenados por un circuito magnético.

Denominaremos a los circuitos eléctricos "primario" y "secundario". También se los suele denominar de "alta tensión" A.T. y "baja tensión" B.T., sin que esto implique necesariamente que el primario o secundario sea la alta tensión o viceversa.

Se denominan columnas o núcleo a las partes del circuito que poseen bobinas y yugo o culata a las que no.- (fig. 1).



Constructivamente en muy raras ocasiones se hacen así, pero el esquema es muy simple y didáctico para su estudio.

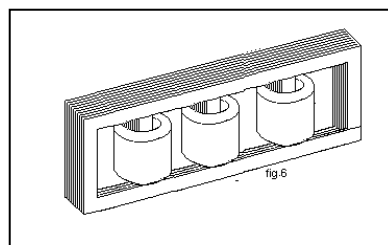
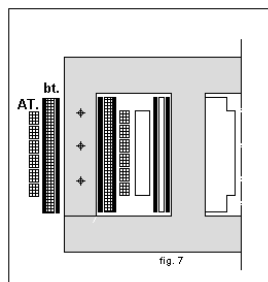
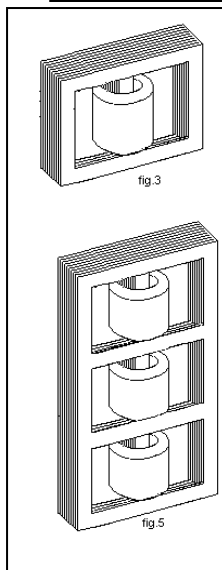
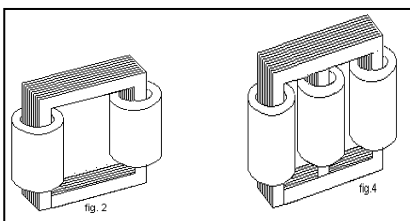
Tipos constructivos

los tipos constructivos que se encuentran habitualmente son:

(a) transformador monofásico de columnas (fig.2); (b) monofásico acorazado (fig.3); (c) trifásico de columnas (fig. 4); (d) trifásico acorazado (Fig. 5); (e) trifásico de 5 columnas (Fig.6) y (f) trifásico exafásico (fig 4) con derivaciones intermedias.-

Constructivamente, siempre se disponen el primario y el secundario, en forma coaxial (Fig. 7), para reducir al mínimo la dispersión. El de menor tensión junto al núcleo y el de mayor tensión montado sobre el anterior.

Se observa que todos los tipos constructivos, tienen una parte en común: un primario y un secundario sobre un mismo circuito magnético, es por esto que cualquiera sea el tipo constructivo, lo podemos estudiar en forma esquemática como en la fig.1.



Aplicaciones y ejemplos

Los transformadores monofásicos, (a) y (b), tanto de columnas como acorazados, se usan en distribución de energía eléctrica, por ejemplo para reducir, en líneas de media tensión, 13,2 kV a baja tensión 220 V. Se los suele encontrar, de pequeña potencia, en líneas eléctricas rurales, sobre soportes monoposte. También se los encuentra de gran potencia, para construir bancos trifásicos, con tres de ellos, en sistemas de distribución.- Ej. (a) 10 kVA; 13.200/220V; (b) 48 MVA; 225/15 kV

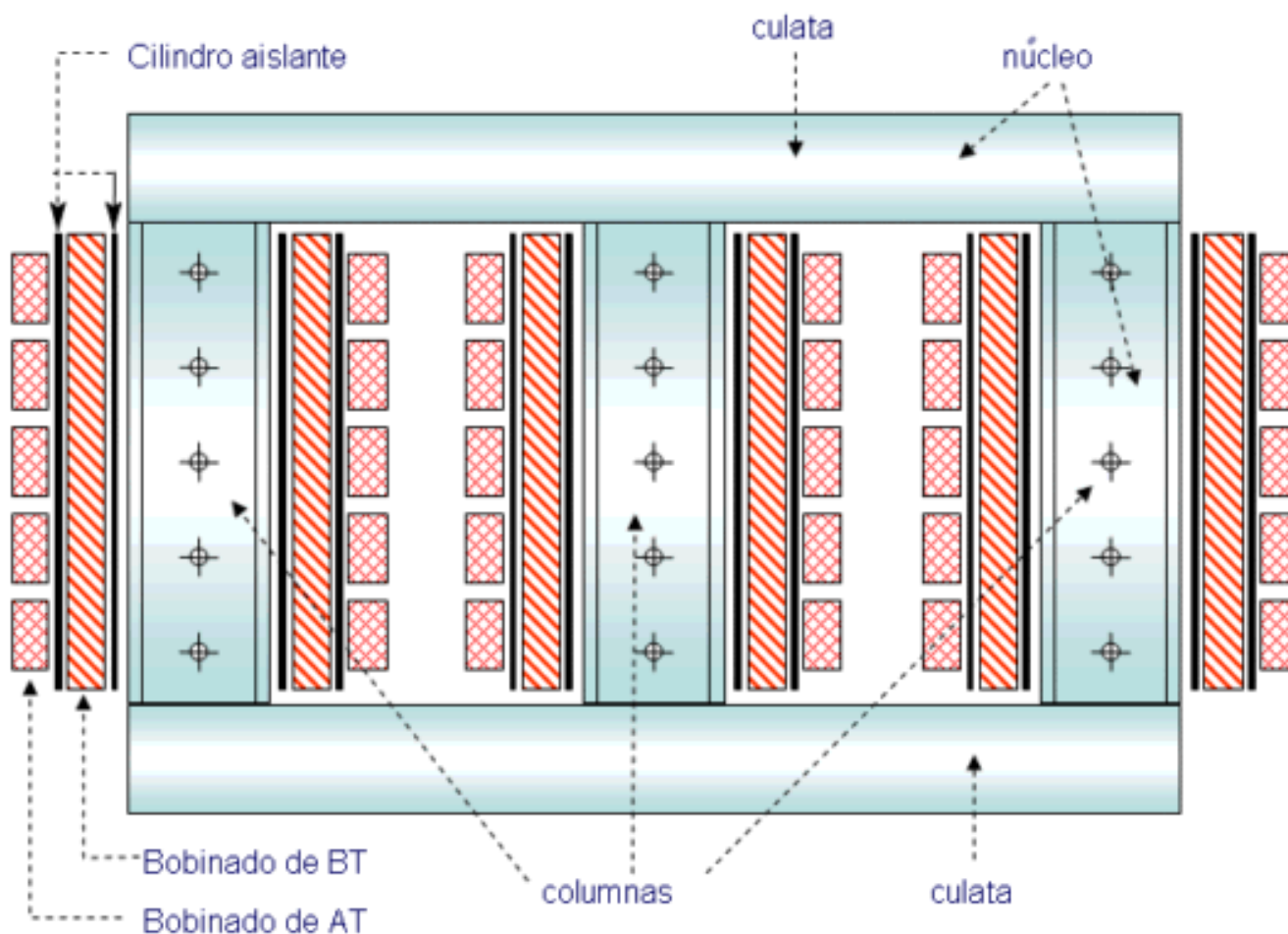
(c) El trifásico de columnas es el más usado. Se los encuentra desde pequeñas potencias, 10 kVA hasta muy grandes 150 MVA.

Como elevadores de tensión en las usinas, reductores en las subestaciones, de distribución en ciudades, barrios, fábricas, etc. Ej. 100 kVA; 13.200/400-231 V; 150 MVA 167/11 kV

(d) El trifásico acorazado, debido a su gran robustez mecánica, que lo hace soportar esfuerzos de cortocircuito frecuentes, se usa para hornos eléctricos. Ej. 13 MVA; 41.000/70-120 V; 32.000 A.

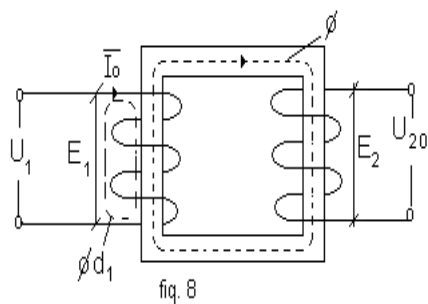
(e) Trifásico de 5 columnas: cuando las potencias son muy grandes, el transformador trifásico normal adquiere dimensiones que imposibilitan su transporte y ubicación posterior. Para igualdad de potencia, uno de cinco columnas es más bajo. Ej. 15 MVA; 225 /15 kV.

(f) EL exafásico (6 fases en el secundario) se diferencia, constructivamente del trifásico, en que tiene una derivación a la mitad de los devanados secundarios, y luego por supuesto, en la conexión entre ellos. Se lo usa para rectificación industrial y en tracción eléctrica: trolebuses, subterráneos, tranvías, etc. Ej. 13200 / 580 V



Vista en corte de un transformador trifásico

Principio físico de funcionamiento

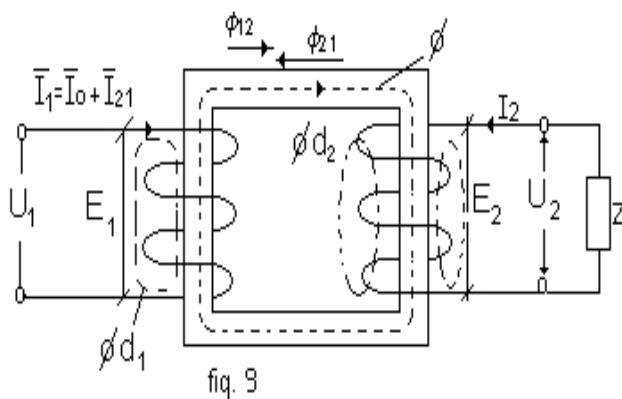


Transformador en vacío

Considerando al transformador como en la Fig. 8, si le aplicamos una tensión U_1 , al primario, circulará una corriente I_0 , denominada corriente de vacío. Esta corriente que circula en las N_1 espiras primarias, producirá un flujo principal $\Phi = \Lambda \cdot N_1 \cdot I_0$. Este flujo variable senoidalmente, inducirá en el primario y secundario, las Fem.

$$e_1 = -N_1 \frac{d\phi}{dt} \text{ y } e_2 = -N_2 \frac{d\phi}{dt}$$

Como, por razones de aislación, las N_1 espiras no pueden estar perfectamente unidas al núcleo, por esta separación pasarán líneas de campo que no son concatenadas por el secundario y cierran en el aire, las llamaremos flujo disperso del primario: ϕ_{d1} . La fem e_2 , en valor eficaz, se puede medir en vacío por lo que se la puede llamar también "tensión secundaria en vacío": $U_{20} = E_2$



Transformador en carga

Cuando le aplicamos una carga cualquiera Z al secundario, cerramos el circuito y circulará una corriente I_2 (Fig.9). Esta corriente, al circular por las N_2 espiras, creará un flujo ϕ_{21} que tenderá a

oponerse a la causa que lo produjo ϕ disminuyéndolo, pero si disminuye ϕ , disminuye E_1 y aumentará la corriente primaria. Este aumento de corriente primaria, que llamaremos I_{21} , corriente secundaria reflejada o referida al primario, al circular por las N_1 espiras, creará un flujo ϕ_{12} que se opone al que lo crea ϕ_{21} cancelándolo exactamente. Por lo que en definitiva queda solo ϕ .

El transformador es una máquina a flujo constante. Por las mismas consideraciones anteriores, aparece el flujo disperso secundario ϕ_{d2} . La corriente primaria I_1 será la suma vectorial de la corriente de vacío I_0 más la secundaria reflejada en el primario I_{21} .

En el circuito secundario, aparece la tensión U_2 a los bornes de la impedancia de carga, debida a las caídas de tensión interna, siendo siempre U_2 menor que E_2 .

Circuito equivalente

El devanado primario, al estar constituido por conductores de cobre o aluminio, posee resistencia R_1 . Al flujo disperso en el primario se lo puede representar por una inductancia $L_1 = \frac{N \cdot \phi_{d1}}{I_1}$ y a su vez por la reactancia;

$X_1 = \omega L_1$ de la misma manera el secundario.-

Al circuito magnético lo representamos por un acoplamiento magnético caracterizado por un flujo Φ . Consideramos una carga cualquiera, determinada por una impedancia genérica Z con sus tensiones y corrientes, queda así determinado el circuito equivalente de un transformador por fase. (Fig. 10)

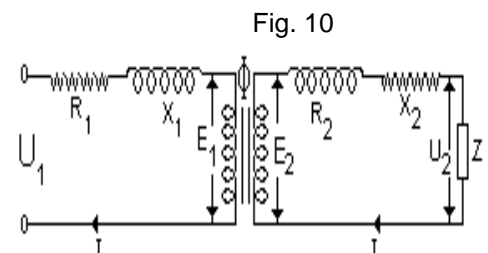


Fig. 10

Diagrama vectorial

Para su trazado, partiremos del supuesto que conocemos el flujo

ϕ ; siendo la tensión senoidal, también lo será el flujo, que podemos escribirlo $\phi(t) = \Phi \sin \omega t$

La Fem inducida primaria será: $E_1 = -N_1 \frac{d\phi}{dt} = -N_1 \omega \Phi \cos \omega t$ en atraso de 90° respecto a $\Phi = \phi_{\max}$

Su módulo será: $|E_1| = N_1 \omega \Phi$ siendo módulo, es valor máximo, expresándolo en valor eficaz y explicitando f se obtiene la llamada "Formula de Boucherot"

$$E_1 = \frac{2\pi}{\sqrt{2}} f N_1 \Phi$$

$$E_1 = 4,44 f N_1 \Phi$$

Análogamente para $E_2 = 4,44 f N_2 \Phi$ y en general:

$$E = 4,44 f N \Phi$$

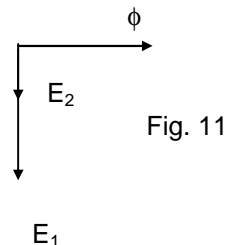


Fig. 11

Esta expresión nos está indicando la condición de flujo cte, ya que, si tenemos E y $f = cte$, será $\Phi = cte$

Sus dimensiones son (V) = (Hz). (Wb)

Podemos ahora trasladar al diagrama vectorial los vectores Φ función (+ sen ωt), E_1 y E_2 función (- cos ωt). Fig.11. La fem. E_1 es inducida por Φ en el primario.-

Si no existiesen las caídas en R_1 y X_1 , por Kirchhoff sería:

$$\overline{U}_1 + \overline{E}_1 = 0 \rightarrow \overline{U}_1 = -\overline{E}_1$$

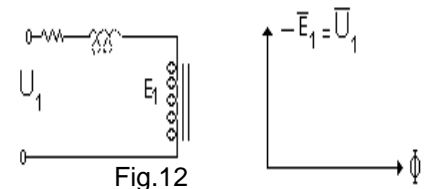


Fig.12

Es decir la tensión aplicada contrarrestaría a la Fem. Inducida, luego $-\overline{E}_1$ es la componente de la tensión aplicada al primario U_1 necesaria para vencer la Fem. Inducida E_1 en éste por el flujo principal, igual y opuesto a ella.-

Ejemplo: Un ejemplo de aplicación de la fórmula anterior (entre muchas otras que veremos más adelante), es el siguiente:

1º) Dado un transformador de 220/110V, construido para 60 Hz. ¿Que le ocurre si se lo conecta en 50Hz?

$$E = 4,44 f \Phi N \text{ Reemplazando por sus valores:}$$

$$220 \text{ V} = 4,44 \cdot 60 \cdot \Phi N \therefore \Phi N = 0,83 \text{ (Al producto } \Phi N \text{ se lo llama "concatenaciones")}$$

Como Φ y N no se pueden cambiar, para 50Hz el segundo miembro será $4,44 \cdot 50 \cdot 0,83 = 184 \text{ V}$

Es decir, si se le aplicase $220 \text{ V} > 184 \text{ V}$ el núcleo se saturaría, calentaría y no se obtendría la tensión esperada.

Conclusión: No puede funcionar a la misma tensión.

2º) Si fuese a la inversa, es decir construido para 50Hz y conectado en 60Hz

$$220 = 4,44 \cdot 50 \cdot \Phi N \therefore \Phi N = 0,99.$$

$$\text{En 60 Hz sería: } 4,44 \cdot 60 \cdot 0,99 = 263 \text{ V}$$

Si se le aplican $220 \text{ V} < 263 \text{ V}$, tendrá menos flujo, menores pérdidas, se mantiene la relación.

Conclusión: Si puede funcionar a la misma tensión.

Tensión por espira: es un factor de dimensionamiento que no hace al funcionamiento de la máquina.

$$\text{De la fem. de Boucherot } E = 4,44 \cdot f \cdot \Phi \cdot N$$

Denominamos "**tensión por espira**" a la relación: $E_N = \frac{E}{N} = 4,44 \cdot f \cdot \Phi$ de donde, para 50Hz, se

$$\text{deduce: } \Phi = \frac{E_N}{4,44 \cdot f} \quad (1) \text{ sus dimensiones son: } [\text{Wb}] = [\text{V} / \text{esp}]$$

La potencia aparente del transformador, prescindiendo de pérdidas y caídas de tensión es;

$$S = E \cdot I = 4,44 f \Phi N I = 222 \Phi N I$$

$$\text{de } \Phi = \frac{E_N}{4,44 \cdot f}, \text{ reemplazando } \Phi \text{ en la anterior es: } S = \frac{222 \Phi^2}{\Lambda}$$

$$\text{Introduciendo (1) } S = \frac{1}{222 \Lambda} E_N^2$$

$$E_N = \sqrt{222 \Lambda S} = K \sqrt{S}$$

El valor de K, para 50Hz, en pequeños transformadores comprendidos entre 3 y 900 VA suele valer:

$0,02 \leq K \leq 0,027$ y para transformadores de tensiones medias (13,2 kV) y potencias comprendidas entre 10 y 10.000 kVA, suele valer: $0,39 \leq K \leq 0,42$

Relación de transformación: Se denomina así al cociente de las Fem. $\frac{E_1}{E_2} = n$

De la relación también se obtiene $\frac{E_1}{E_2} = \frac{N_1}{N_2}$ expresión teórica, ya que las Fem. no se pueden medir. En la prác-

tica, y **con el transformador en vacío**, se verifica: $E_1 \cong U_1$; $E_2 = U_{20}$

Porque en el primario, las caídas de tensión en R_1 y X_1 debidos a la corriente de vacío, son muy pequeñas y en el secundario a circuito abierto, al no haber corriente, la tensión secundaria en vacío: U_{20} , mide E_2 . Por consiguiente, la relación de transformación práctica es:

$$\frac{U_1}{U_{20}} = \frac{N_1}{N_2}$$

Limitaciones: esta relación práctica tiene validez

1º) Solamente para transformadores en vacío.

2º) Para valores eficaces y ondas senoidales.

3º) Para factores de forma no alterados por la saturación del núcleo.

4º) Independiente de la tensión de ensayo, pero no para valores muy superiores a los nominales, para no saturar el núcleo, ni muy inferiores en que sean significativas las caídas por la corriente de vacío. Por esto, deben tomarse tensiones comprendidas entre el 70% y 100% de la nominal.

Ejemplo: Dado un transformador de 100kVA; 13200/400 (231) V trifásico, conexión Δ/Y , determinar:

1º) Tensión por espira; 2º) flujo en el circuito magnético; 3º) Sección del circuito magnético; 4º) relación de transformación; 5º) número de espiras primarias y secundarias.-

1º) Usamos la expresión: $E_N = K\sqrt{S}$

Adoptamos para $K = 0,4$, luego $E_N = 0,4\sqrt{100} = 4V / esp$

2º) El flujo será: $\Phi = \frac{E_N}{222} = \frac{4V / esp}{222} = 0,018 Wb$

3º) La sección del circuito magnético: $\Phi = S \cdot B \rightarrow S = \frac{\Phi}{B} = \frac{0,018 Wb}{1,7T} = 0,0106 m^2 = 106 cm^2$

Adoptando para la inducción: $B = 1,7 T$

4º) La relación n de transformación es: $\frac{U_1}{U_{20}} = \frac{13200V}{231V} = 57,1$ por fase

5º) Número de espiras $N_1 = \frac{U_1}{E_N} = \frac{13200V}{4V / esp} = 3300 esp$; $N_2 = \frac{U_{20}}{E_N} = \frac{231V}{4V / esp} = 57,75 \approx 58$

y se verifica la relación de transformación $\frac{N_1}{N_2} = \frac{3300}{57,75} = 57,14$

Corriente secundaria

Del circuito equivalente podemos escribir: $\overline{I_2} = \frac{\overline{E_2}}{Z_2}$

Siendo Z_2 la impedancia total de la malla secundaria, incluyendo la carga $Z = R + jX$
 $Z_2 = R_2 + jX_2 + Z$; Siendo el vector $\overline{E_2} = -j\omega N_2 \Phi$

El vector $\overline{I_2}$ será: $\overline{I_2} = \frac{-j\omega N_2 \Phi}{(R_2 + R) + j(X_2 + X)}$; Su módulo

$|I_2| = \frac{\omega N_2 \Phi}{\sqrt{(R_2 + R)^2 + (X_2 + X)^2}}$; Su fase: $tg \varphi_2 = \frac{X_2 + X}{R_2 + R}$ Y si suponemos

una carga inductiva estará en atraso de φ_2 respecto de $\overline{E_2}$ Figura 13 su

valor instantáneo: $i_2 = |I_2| \sin \left[\omega t - \left(\frac{\pi}{2} + \varphi_2 \right) \right]$

Tensión secundaria

Conocido I_2 será: $\overline{U_2} = Z \cdot \overline{I_2} = (R + jX) \overline{I_2} = R \cdot \overline{I_2} + jX \cdot \overline{I_2}$ en módulo

$|\overline{U_2}| = \sqrt{R^2 + X^2} \cdot |I_2|$

Y su fase: $\varphi = \arctg X / R$ y en función del tiempo

$u_2(t) = |\overline{U_2}| \sin \left[\omega t - \left(\frac{\pi}{2} + \varphi_2 - \varphi \right) \right]$

Los vectores del segundo miembro, se pueden trasladar al diagrama vectorial

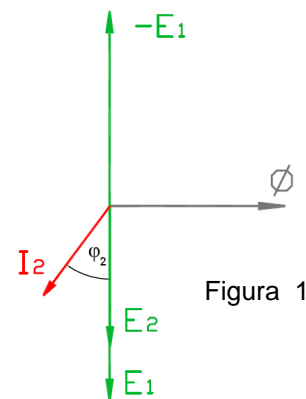


Figura 13

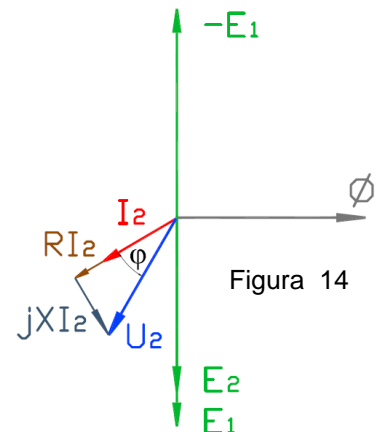


Figura 14

TRANSFORMADORES

6

$R\bar{I}_2$ en fase con \bar{I}_2 ; $jX\bar{I}_2$, en cuadratura y adelanto con \bar{I}_2

Su suma, vectorial dará \bar{U}_2 (Figura 14)

Caídas de tensión internas del secundario

En el circuito equivalente, se observa que E_2 debe equilibrar las caídas ohmicas en R_2 e inductivas en X_2 , más la tensión \bar{U}_2 , es decir:

$$\bar{E}_2 = R_2 \bar{I}_2 + j X_2 \bar{I}_2 + \bar{U}_2$$

Estas caídas están en fase y cuadratura, respectivamente con I_2 lo que nos permite trasladarlas al diagrama, vectorial. (fig.15) La caída interna del secundario, es la diferencia vectorial: $\bar{E}_2 - \bar{U}_2 = \Delta \bar{U}_2$ ó lo que es la mismo: $\bar{U}_{20} - \bar{U}_2$ por lo que se vio en la relación de transformación.

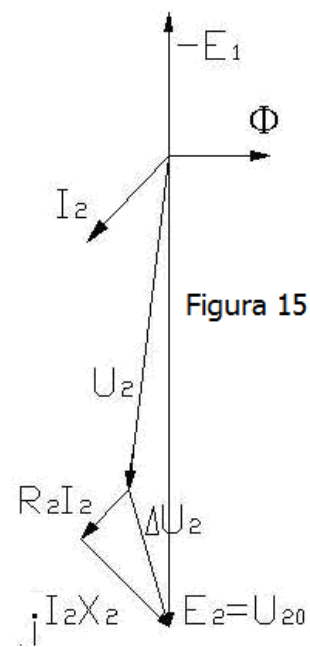


Figura 15

Ejemplo: Un transformador trifásico, estrella en el secundario, tiene una tensión de fase en vacío: $\bar{U}_{20} = 231V$; cuando entra en plena carga la tensión disminuye $U_2 = 220V$; la diferencia *de módulos*, que es lo que mide el voltímetro, es: $|U_{20}| - |U_2| = 231V - 220V = 11V$ caída interna del secundario *en módulo*.

Corriente de vacío

El circuito equivalente del transformador en vacío es (fig.16)

La ecuación de equilibrio es: $\bar{U}_1 = R_1 \bar{I}_0 + j X_1 \bar{I}_0 - \bar{E}_1$ de la que se puede despejar la corriente en vacío I_0 .

Pero lo que realmente interesa, es conocer su forma de onda y fase. Como lo que establece la corriente en vacío, es el circuito magnético, y este queda definido por el hierro usado en el núcleo, es en última instancia la calidad de este, a través de su ciclo de histéresis como se determina la forma y fase de I_0 .

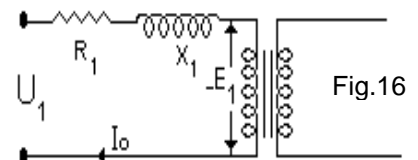


Fig.16

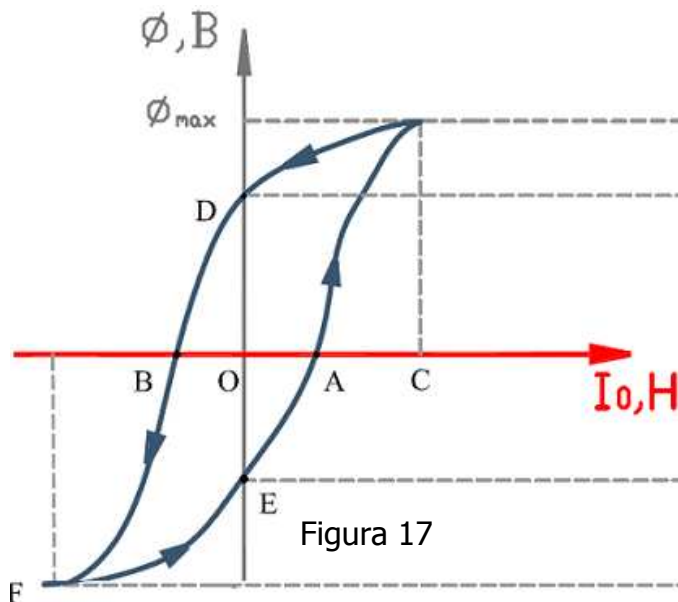


Figura 17

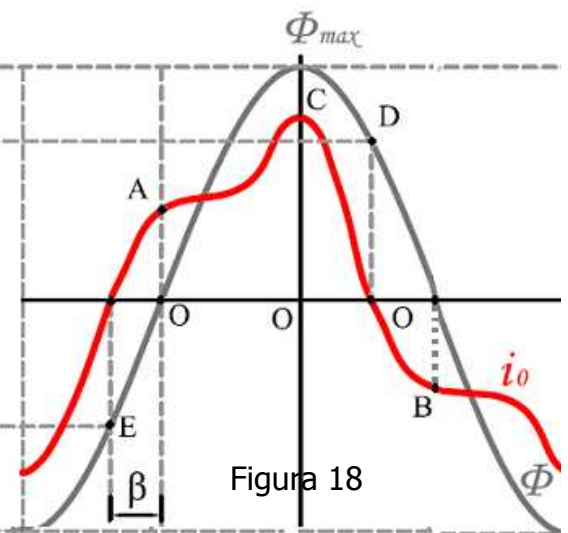


Figura 18

Trazando el ciclo de histéresis (Figura 17) y una onda senoidal del Φ como referencia, (Figura 18) se deduce que, cuando el $\phi = 0$ (punto A) la corriente en vacío vale \overline{OA} , cuando $\phi = \Phi_{max}$, $I_0 = \overline{OC}$; cuando $\phi = \overline{OD}$; $I_0 = 0$. Análogamente cuando el flujo $\phi = \overline{OE}$ y la corriente $I_0 = 0$ y cuando el flujo es cero y la corriente $I_0 = \overline{OB}$. Si llevamos estas cotas a la Figura 18 determinamos varios puntos de la corriente de vacío y así podemos aproximadamente trazar la curva de I_0 .

Conclusiones

1º) La onda de corriente en vacío no es senoidal, la causa es la presencia del hierro en el circuito magnético.-

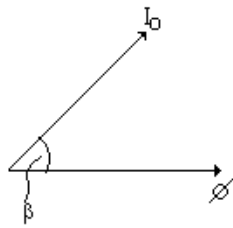


Figura 19

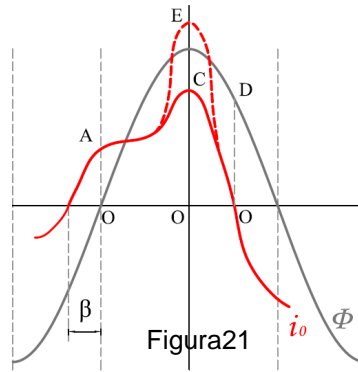


Figura 21

2º) La corriente en vacío adelanta un ángulo β respecto al flujo, por consiguiente vectorialmente será según (fig. 19) y el

diagrama vectorial del transformador en vacío será (fig.20), teniendo en cuenta el circuito equivalente y la ecuación de equilibrio.-

3º) Mientras más saturado este el hierro, menos senoidal será la onda, presentando máximos muy agudos (OE) (Fig.21) que da origen a mayores armónicas.-

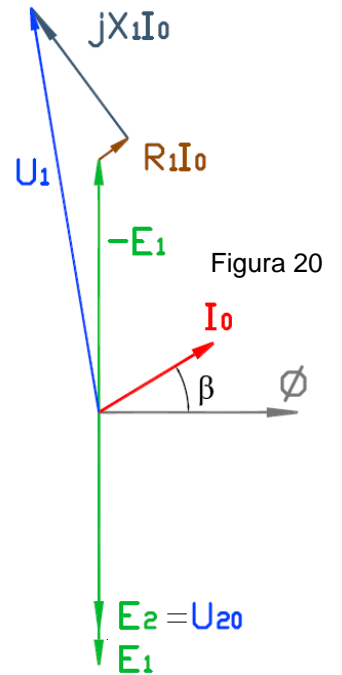


Figura 20

Fuerza magnetomotriz total:

Al conectar el secundario a la carga, se origina \bar{I}_2 , cuya f.m.m. $N_2 \bar{I}_2$ oponiéndose a la causa que lo produce, tiende a debilitar el flujo del núcleo, y por consiguiente a disminuir \bar{E}_1 .

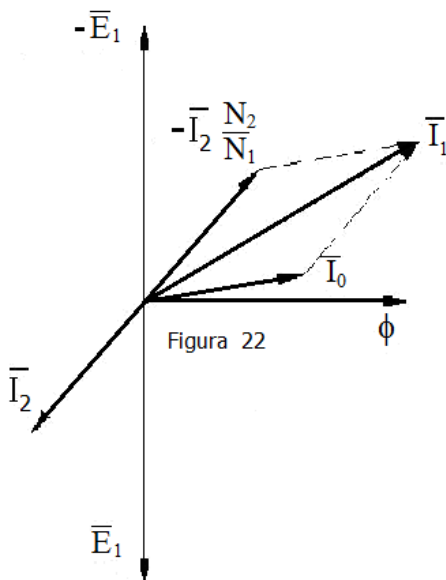


Figura 22

Esta disminución de \bar{E}_1 hace crecer la corriente en el primario, produciendo una f.m.m. $N_1 \bar{I}_1$ igual y opuesta a la anterior, restableciendo el equilibrio eléctrico y manteniendo la transferencia de energía; o sea, el flujo del núcleo queda prácticamente sin variación al pasar de vacío a carga.-

Decir que: flujo en vacío = flujo en carga, es lo mismo que escribir: $N_1 \bar{I}_0 = N_1 \bar{I}_1 + N_2 \bar{I}_2$ siendo está la ecuación de equilibrio del circuito magnético.-

Un estudio más exacto, nos diría que el flujo en vacío, es en realidad mayor que el flujo en carga, en efecto: en vacío: $\bar{U}_1 = R_1 \bar{I}_0 + jX_1 \bar{I}_0 - \bar{E}_1$

al entrar en carga \bar{I}_0 crece

hasta \bar{I}_1 luego aumentan $R_1 \bar{I}_0$ y $X_1 \bar{I}_0$; y como $\bar{U}_1 = \text{cte}$, E_1 disminuye y por consiguiente, disminuye el flujo según la fórmula: $E_1 = 4,44 f \cdot \Phi N_1$. Esto último se puede ver en el diagrama vectorial (Fig.20) haciendo crecer los vectores $R_1 \bar{I}_0$ y $X_1 \bar{I}_0$, manteniendo cte. U_1 , se observa que disminuye E_1 .

Como esta variación no es muy grande, es que se considera prácticamente que los flujos son iguales.-

Corriente primaria

De la ecuación del circuito magnético: $N_1 \bar{I}_0 = N_1 \bar{I}_1 + N_2 \bar{I}_2$

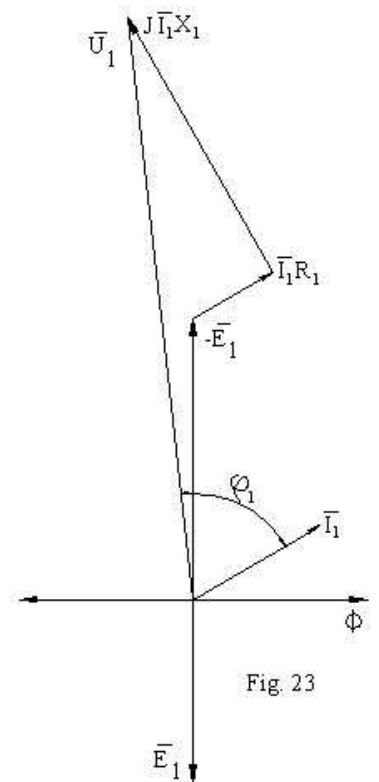


Fig. 23

Dividiendo por N_1 y despejando \bar{I}_1 queda: $\bar{I}_1 = \bar{I}_0 + \left(-\frac{N_2}{N_1} \bar{I}_2 \right)$

lo que nos dice que al vector \bar{I}_0 que ya tenemos en el diagrama vectorial, le debemos sumar un vector opuesto a \bar{I}_2 multiplicado por $\frac{N_2}{N_1}$, para obtener \bar{I}_1 (Fig. 22)

Tensión primaria

De la malla del primario, en el circuito equivalente se obtiene su ecuación de equilibrio que es: $\bar{U}_1 = R_1 \bar{I}_1 + j X_1 \bar{I}_1 - \bar{E}_1$; que nos dice: al vector $-\bar{E}_1$ que tenemos en el diagrama vectorial, le tenemos que sumar $R_1 \bar{I}_1$ en fase con \bar{I}_1 más $j X_1 \bar{I}_1$ en cuadratura y adelanto (+j) para obtener \bar{U}_1 . El desfase entre tensión y corriente primaria es ϕ_1 como muestra la Figura 23.-

En la realidad, el triángulo de caídas de tensión en el primario, a plena carga, antes mencionado, es tan pequeña (representa menos del 1% de la tensión nominal del primario U_{1n}) que prácticamente los vectores $-\bar{E}_1$ y \bar{U}_1 están en fase sobre el eje vertical. Se dibuja en mayor tamaño para diferenciar los vectores que representan las caídas de tensión primaria y mostrar sus ubicaciones relativas.

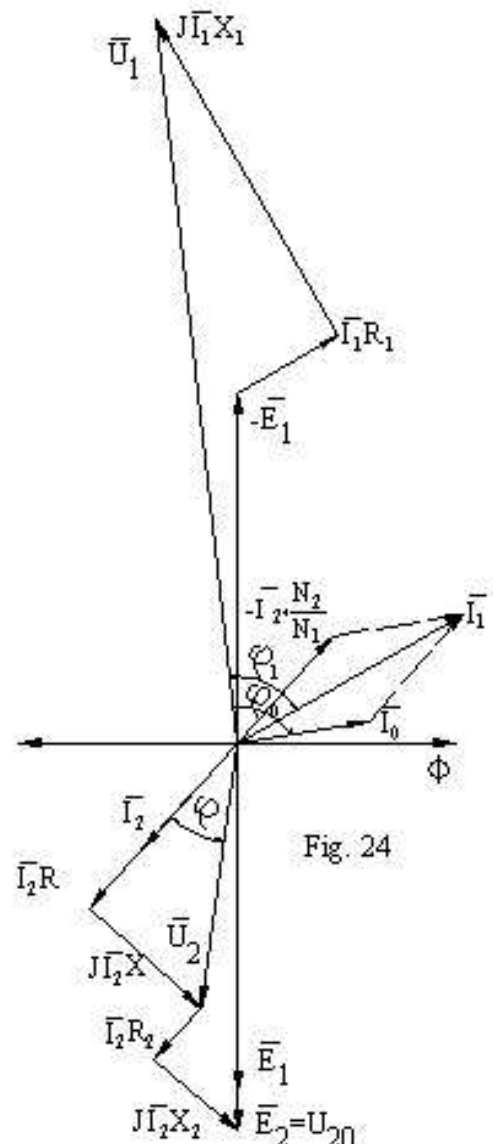
Valores reales:

Como se recordará, se partió del supuesto que conocíamos Φ , como dato, cuando en realidad es más correcto partir de U_1 . Por lo tanto, para obtener el diagrama vectorial con sus valores reales, bastará con cambiar la escala con que se trazó el mismo, en la relación U_1 del diagrama dividido U_1 dato.

Conclusiones:

Por último el diagrama vectorial completo quedaría (Fig. 24). Observando el diagrama se desprenden las siguientes conclusiones:

- 1º) Un transformador desfasa la corriente de salida respecto de la de entrada en casi 180° . La causa de que no sea exactamente 180° es debido a la presencia del hierro.-
- 2º) **Un transformador conectado a una línea empeora el $\cos\phi$** , es decir, para la red, el ángulo de la Z de carga ϕ , es ϕ_1 , porque la red ve a la impedancia con ese ángulo. En el diagrama se observa que $\phi_1 > \phi$.-
- 3º) **En los transformadores de medición, aparecen errores de relación y de ángulo.** En los Transformadores de intensidad el error de relación I_1/I_2 , es debido a la corriente de vacío \bar{I}_0 ; y el error de ángulo a que el desfase no es exactamente de 180° . En los transformadores de tensión el error de relación U_1/U_2 , es debido a las caídas internas y el error de ángulo al desfase entre U_1 y U_2 .-
- 4º) **También se deduce del diagrama vectorial, el porque los transformadores de intensidad no deben trabajar en vacío.** Es una máquina que trabaja normalmente en corto circuito (alimenta un amperímetro) por consiguiente son grandes $R_1 \bar{I}_1$ y $X_1 \bar{I}_1$, pequeños $-\bar{E}_1$ y Φ ; al pasar a trabajar en vacío la corriente disminuye $I_0 \ll I_{cc}$, disminuyen $R_1 \bar{I}_0$ y $X_1 \bar{I}_0$, crece $-\bar{E}_1$ (Recordar que $U_1 = cte.$) y como se trabaja con bajas inducciones, para que sea lineal, el flujo puede crecer mucho, aumentando las tensiones, lo que puede perforar los aislantes, saturando el núcleo y calentado el hierro.-
- 5º) Además se observa que $\phi_0 \gg \phi_1$ lo que nos dice que un transformador en vacío, tiene muy mal $\cos\phi$.- (Aproximadamente 0,10).-



6) De la expresión $N_1 \bar{I}_0 = N_1 \bar{I}_1 + N_2 \bar{I}_2$ considerándola a plena carga, despreciando la corriente en vacío, y haciendo abstracción del signo, es decir, en forma escalar, queda: $N_1 I_1 = N_2 I_2$ que con la relación de transformación podemos escribir: $\frac{U_1}{U_{20}} = \frac{N_1}{N_2} = \frac{I_2}{I_1} = n$

Relación entre tensiones, espiras y corriente de uso práctico.-

Reducción del circuito equivalente a la malla del primario o secundario

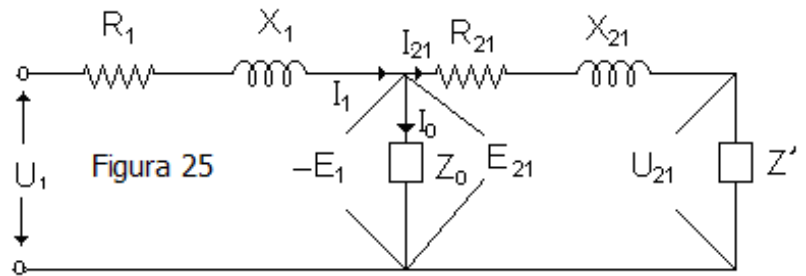
Estudiamos primeramente la reducción al primario.

De la expresión: $N_1 \bar{I}_0 = N_1 \bar{I}_1 + N_2 \bar{I}_2$ (1) Dividiendo por N_1 : $\bar{I}_0 = \bar{I}_1 + (N_2 / N_1) \bar{I}_2$

Finalmente $\bar{I}_1 = \bar{I}_0 - (N_2 / N_1) \bar{I}_2$ Llamando a $-(N_2 / N_1) \bar{I}_2 = \bar{I}_{21}$ (2) Corriente secundaria referida al

primario, queda: $\bar{I}_1 = \bar{I}_0 + \bar{I}_{21}$ o bien:

$\bar{I}_0 = \bar{I}_1 - \bar{I}_{21}$ (3) Es decir, se ha transformado una ecuación magnética (1) en una eléctrica (3), lo que significa que se puede reemplazar el circuito magnético por una rama eléctrica que contenga una Z_0 en derivación que haga circular I_0 .



Pero como antes de colocar esta Z_0 se tenía $E_1 \neq E_2$, y ahora deben ser las tensiones iguales, vistas desde ambos lados de Z_0 , es decir debería ser $E_1 = E_{21}$. A fin de mantener las mismas condiciones en la malla secundaria, habrá que variar R_2 , X_2 , Z y U_2 , o sea determinar los nuevos valores referidos al primario R_{21} , X_{21} , Z' , U_{21} , e I_{21} fig25

Determinación de R_{21} , X_{21} ; Z_{21}

La ecuación de equilibrio para el secundario, en el circuito equivalente (Fig.10) era: $\bar{I}_2 = \frac{\bar{E}_2}{R_2 + jX_2 + Z}$

Reemplazando $E_2 = E_1/n$, y a la vez dividiendo miembro a miembro por n , (siendo $n = N_1 / N_2$, relación de transformación), y teniendo en cuenta (2), queda: $\frac{\bar{I}_2}{n} = \frac{\bar{E}_1}{n^2 R_2 + jn^2 X_2 + n^2 Z} = -\bar{I}_{21}$

La ecuación de equilibrio para el secundario, en este circuito equivalente reducido al primario (Fig. 25) es ahora con $E_1 = E_{21}$; $\bar{I}_{21} = \frac{-\bar{E}_1}{R_{21} + jX_{21} + Z_{21}}$

Y para que ambas sean iguales, debe ser: $R_{21} = n^2 R_2$; $X_{21} = n^2 X_2$; $Z' = n^2 Z$

Determinación de U_{21} : para reducir la tensión secundaria al primario, bastará multiplicar por la relación de transformación: $U_{21} = n \cdot U_2$

Determinación de I_{21} : para reducir la corriente secundaria al primario, se divide por la relación de transformación: $I_{21} = I_2 / n$

Reducción a la malla del secundario: en algunos casos, en el estudio de los transformadores en paralelo, es más conveniente estudiar a la máquina como un circuito reducido al secundario. Con el mismo criterio expuesto para el caso anterior, se determina que los factores de reducción son inversos.-

RESUMEN

	FACTORES DE REDUCCION	
	AL PRIMARIO	AL SECUNDARIO
IMPEDANCIAS Y SUS COMPONENTES	n^2	$1/n^2$
TENSIONES	n	$1/n$
CORRIENTES	$1/n$	n

Potencia del circuito magnético

En el transformador, el circuito magnético recibe energía eléctrica a través del arrollamiento primario y transfiere energía eléctrica al secundario a través del flujo de campo magnético variable, actuando como una interfase entre ambos, a menos de las pérdidas lógicas en toda conversión de energía, que en este caso, son las pérdidas en el hierro. Se ha operado así una transformación de energía eléctrica del primario en energía magnética en el hierro y esta nuevamente en eléctrica en el secundario. El problema es expresar esta potencia del circuito magnético en función de parámetros fáciles de determinar o estimar con buena aproximación. La potencia que recibe el circuito magnético y por consiguiente su capacidad de transmitirlo al secundario es:

$$S = E_1 I_1 = E_2 I_2$$

Si efectuamos la semisuma de ambas expresiones sustituyendo de la Formula de Boucherot la expresión de la Fem. $E = 4,44.f.\Phi.N$ se deduce la **potencia aparente por fase** como sigue:

$$S_{em} = \frac{E_1 \cdot I_1 + E_2 \cdot I_2}{2} = \frac{4,44.f.\Phi.N_1.I_1 + 4,44.f.\Phi.N_2.I_2}{2} = 2,22.f.\Phi.(N_1.I_1 + N_2.I_2) \text{ y teniendo en cuenta}$$

que $\delta_1 = \frac{I_1}{S_{Cu1}}$; $\delta_2 = \frac{I_2}{S_{Cu2}}$ con S_{Cu1} y S_{Cu2} secciones de los conductores (alambre o planchuela) con que

está bobinado el primario y el secundario y siendo $N_1.S_{Cu1} = A_{Cu1}$ (sección de cobre de los N_1 conductores del arrollamiento primario) y análogamente para el secundario $N_2.S_{Cu2} = A_{Cu2}$ y considerando que $\Phi = B_{max} \cdot A_{Fe}$

Resultará $S_{em} = 2,22.f.B_{max} \cdot A_{Fe} \cdot (N_1.S_{Cu1} \cdot \delta_1 + N_2.S_{Cu2} \cdot \delta_2) = 2,22.f.B_{max} \cdot A_{Fe} \cdot (A_{Cu1} \cdot \delta_1 + A_{Cu2} \cdot \delta_2)$ y si

llamamos densidad de corriente media equivalente a $\delta_{meq} = \frac{\delta_1 \cdot A_{Cu1} + \delta_2 \cdot A_{Cu2}}{A_{Cu1} + A_{Cu2}}$ y $A_{Cu} = A_{Cu1} + A_{Cu2}$ se

obtendrá finalmente:

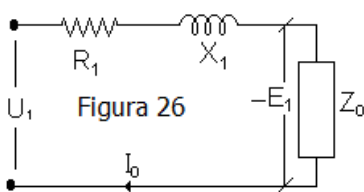
$$S_{em} = 2,22.f.B_{max} \cdot A_{Fe} \cdot A_{Cu} \cdot \delta_{meq}$$

Esta fórmula sirve para determinar la potencia de un transformador desconocido (sin chapa de identificación) o para calcular, teniendo sólo el núcleo, que transformador, ¿de que potencia? se puede construir a partir de dicho núcleo, extrayendo de la práctica y/o experiencia los valores Standard de la densidad media equivalente y la inducción magnética B en sus respectivas unidades.-

Transformador en vacío

Determinación de I_0 y Z_0 : Con el transformador en vacío, no trabaja la malla del secundario, por consiguiente, el circuito equivalente y el diagrama vectorial quedan: Fig.26

Del circuito equivalente:



$$\overline{I_0} = -\overline{E_1} / Z_0 = -\overline{E_1} \cdot Y_0$$

$$\overline{I_0} = -\overline{E_1} (G_0 - jB_0)$$

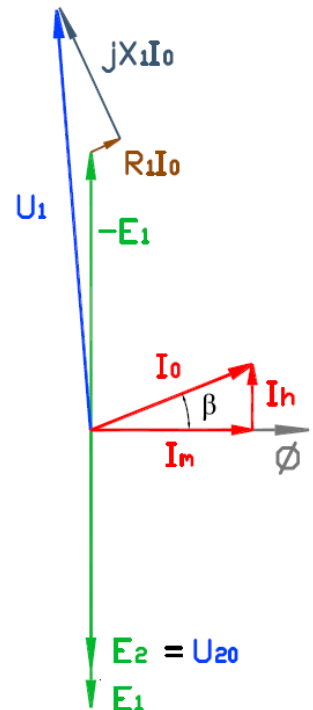
$$\overline{I_0} = -\overline{E_1} G_0 - j(-\overline{E_1})B_0$$

De las proyecciones de I_0 en el diagrama vectorial; $\overline{I_0} = \overline{I_h} + \overline{I_m}$

Denominaremos corriente histerética I_h a la componente en fase con $-\overline{E_1}$, que es la que disipa energía en forma de calor en el núcleo; y llamaremos corriente magnetizante I_m , a la componente en cuadratura, que es la que almacena energía magnética o la que produce el flujo en el circuito magnético.

De las expresiones anteriores: $\overline{I_h} = -\overline{E_1} G_0 = -\overline{E_1} / R_0$; $\overline{I_m} = -j(-\overline{E_1})B_0 = -\overline{E_1} / jX_0$

Al tener una corriente en fase que produce calor, el parámetro eléctrico que lo representa es una R_0 . En cuadratura la corriente magnetizante, queda representada como circulando por una reactancia que no produce pérdidas de potencia X_0 .



Por consiguiente, Z_0 será: Figura 27

Se deduce: módulo: $|I_0| = \sqrt{I_h^2 + I_m^2}$; En % de I_1 :

$I_0\% = I_0 \times 100 / I_1$; y la Fase: $\cos \varphi_0 = P_0 / U_1 I_0$; siendo

P_0 = potencia absorbida en vacío.

La corriente en vacío en los transformadores es pequeña, alrededor del 8% para 10 kVA y hasta 4% en los de 10 MVA

Ejemplo:

Se ensaya en vacío un transformador de 100 KVA, 13200/400-231 V trifásico; Δ/Y , obteniéndose las siguientes mediciones:

- Tensión aplicada en BT: 400 V

- Corrientes en las fases U, V, W, en BT: $I_u = 6A$, $I_v = 4,4 A$; $I_w = 6A$

Este desequilibrio es debido a las diferentes permeancias de cada columna, siendo mayor en la del centro, menores e iguales en las de los extremos.

- Indicaciones de los vatímetros: $W_{uv} = 1260 W$; $W_{vw} = 1780 W$.

- Corriente de vacío: $I_0 = \frac{I_u + I_v + I_w}{3} = \frac{6 + 4,4 + 6}{3} = 5,47 A$

- Pérdidas en vacío: $W_0 = W_{vw} - W_{uv} = 1780 - 1260 = 520 W$

Cuando el $\cos \varphi \leq 0,5$ la indicación de los vatímetros en la conexión Aron se restan.

- Corriente en vacío porcentual: $I_0\% = \frac{I_0}{I_{n2}} 100 = \frac{5,47}{152} 100 = 3,6\%$

Siendo $I_{n2} = \frac{S}{\sqrt{3} U_2} = \frac{100000}{\sqrt{3} 380} = 152 A$

- Impedancia equivalente en vacío, o de excitación por fase: $Z_{ex2} = \frac{U_{20}}{I_0} = 231 / 5,47 = 42,2 \Omega$

Es a los fines de considerar al transformador en vacío, como carga del sistema al que está conectado, no es la Z_0 del circuito equivalente.

- $\cos \varphi_0$ en vacío : $W_0 = \sqrt{3} U_{20} I_0 \cos \varphi_0$

-

$$\cos \varphi_0 = \frac{W_0}{\sqrt{3} U_{20} I_0} = \frac{520}{\sqrt{3} 400 5,47} = 0,137$$

- Corriente histerética:

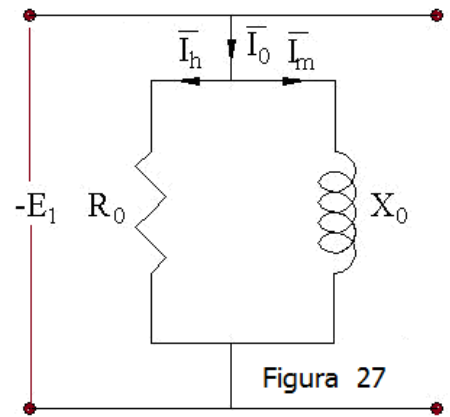
$$I_h = I_0 \cos \varphi_0 = 5,47 \cdot 0,137 = 0,75 A \text{ ó también}$$

$$I_h = \frac{W_0}{3 U_{20}} = \frac{520}{3 \cdot 231} = 0,75 A$$

- Corrientes magnetizante:

$$I_m = I_0 \sin \varphi_0 = 5,47 A \text{ ó también:}$$

$$I_m = \sqrt{I_0^2 - I_h^2} = \sqrt{5,47^2 - 0,75^2} = 5,42 A$$



Prácticamente toda la corriente de vacío $I_0 = 5,47 \text{ A}$ es magnetizante $I_m = 5,42 \text{ A}$

Como las mediciones se hicieron del lado de BT y el transformador en vacío va a estar conectado a la AT, se deben referir los parámetros al lado de AT.

La relación de transformación es:

$$n = \frac{U_1}{U_{20}} = \frac{13200}{400} = 33$$

La corriente primaria nominal: $I_n = \frac{S}{\sqrt{3} \cdot U_1} = \frac{100 \text{ KVA}}{\sqrt{3} \cdot 13,2 \text{ KV}} = 4,38 \text{ A}$

$$Z_{ex1} = Z_{ex2} n^2 = 42,2 \left(\frac{13200}{400} \right)^2 = 46 \text{ K}\Omega, \quad I_{01} = \frac{I_{02}}{n} = 5,47 \frac{400}{13200} = 0,165 \text{ A}$$

$$I_{01} \% = \frac{0,165}{4,38} 100 \cong 3,7 \% \cong 3,6 \% \text{ obtenida anteriormente.}$$

ESTUDIO DE I_m

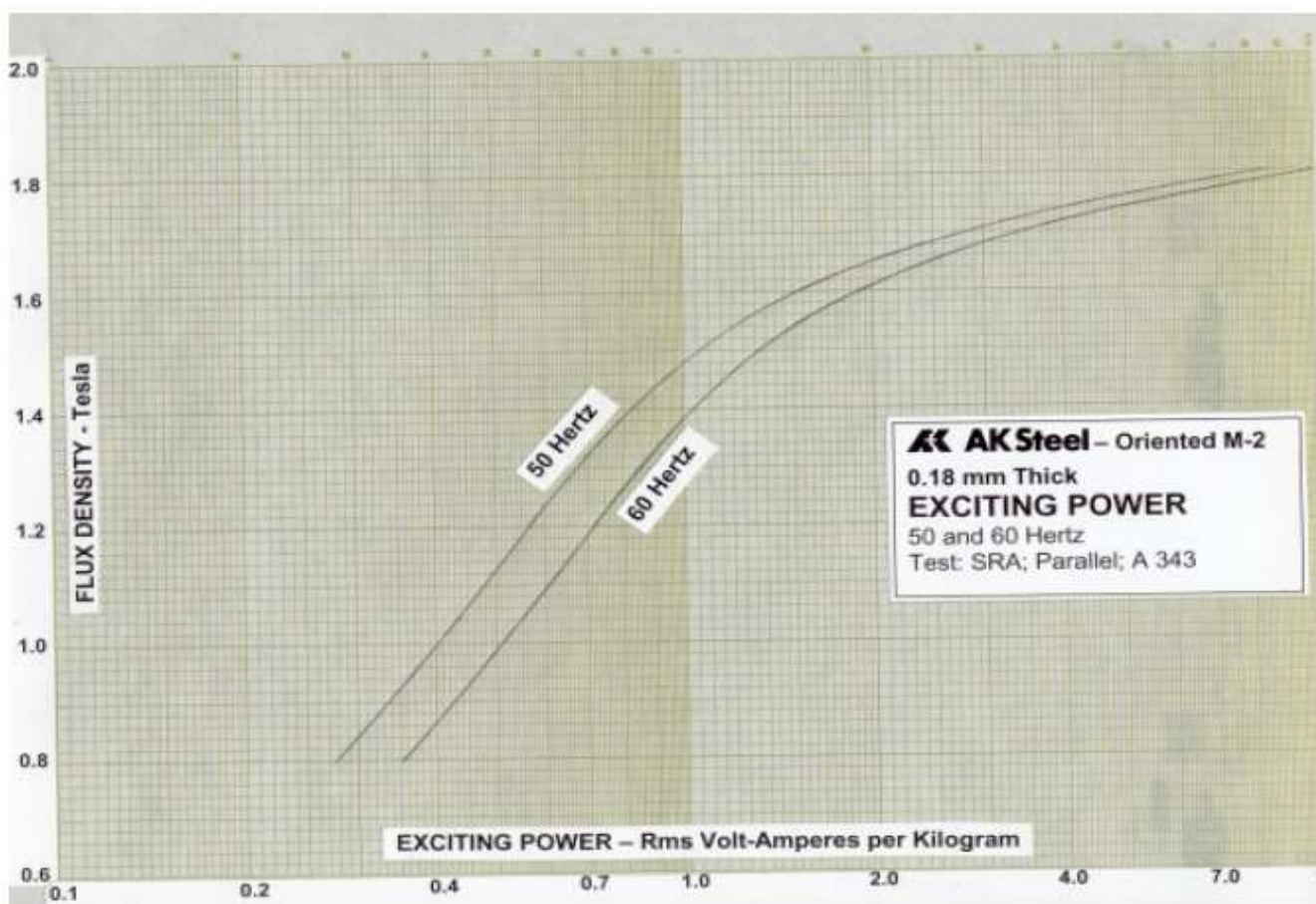
Dado el circuito magnético, se podrían calcular los amperios vueltas máximos necesarios para excitarlo, sumando las tensiones magnéticas en el núcleo, yugo y entrehierro, según la expresión:

$$\sum N_i I_m = H_n \ell_n + H_y \ell_y + H_e \ell_e$$

Como los valores de las excitaciones H_k se obtienen de las curvas $B = f(H)$ suministradas por los fabricantes de las chapas magnéticas en valores máximos pues B se obtiene del Φ_{\max} y consecuentemente $N_1 \cdot I_m$ está en valor máximo, para tenerlo en valores eficaces, debemos dividirlo por el factor de amplitud $K_a = \frac{I_{\max}}{I_{ef}}$ del cual, algunos valores se indican en el cuadro

$B_{\max} \text{ (T)}$	1	1,2	1,4
K	1,70	1,90	2,35

Por consiguiente, la corriente eficaz magnetizante, por fase, será:
$$I_m = \frac{\sum H_i \cdot l_i}{K_a N_1}$$

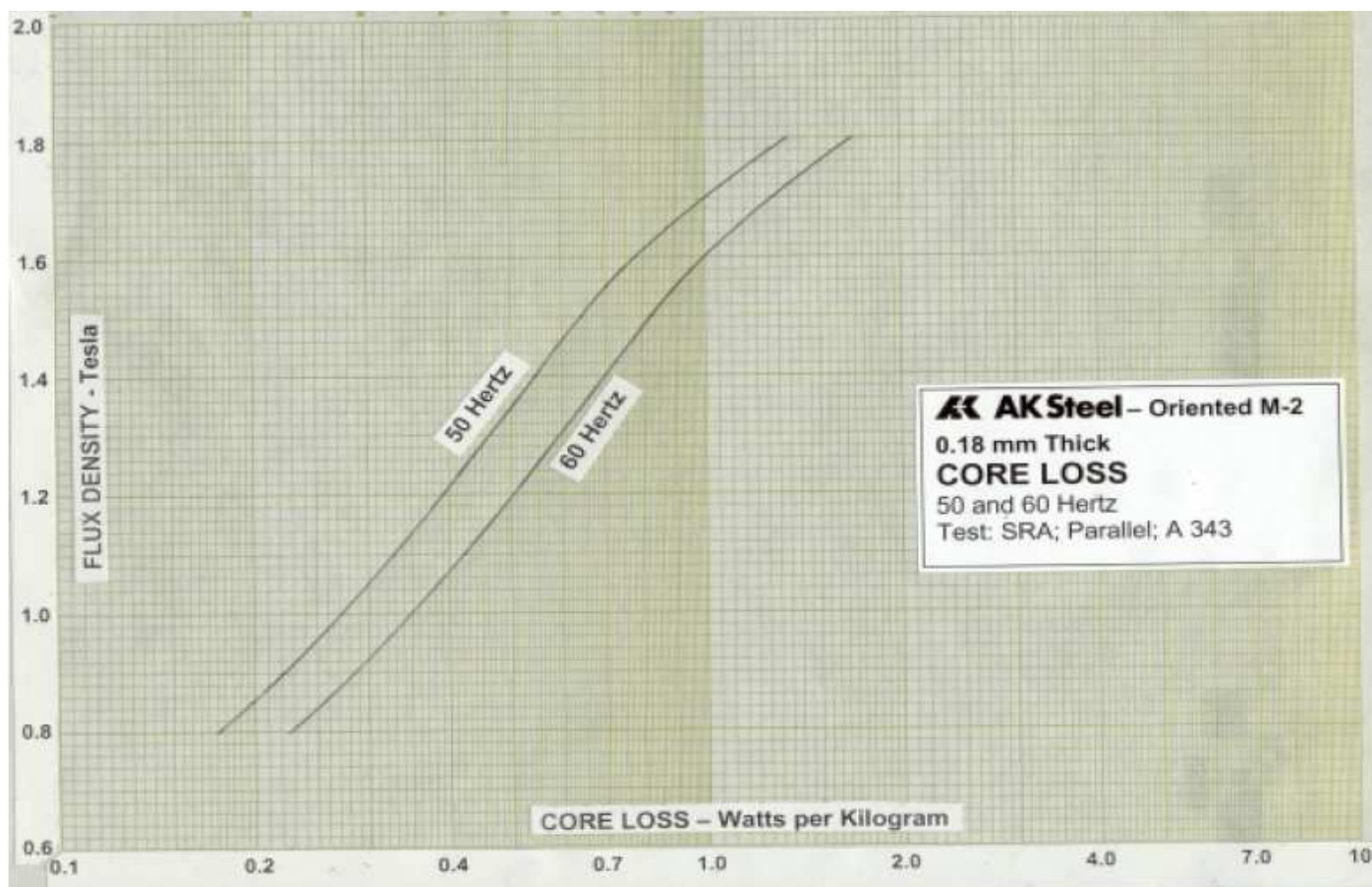


Como es muy difícil apreciar la longitud del entrehierro, (ℓ_e) los valores que se obtienen por este método, son poco aproximados. De no poseer la curva $B = f(H)$, y sí la de "inducción en función de la excitación", (en VA eficaces en vacío, por kg), $B = f(VA/Kg)$ como se observa en la curva siguiente, se obtiene de:

$$I_m = \frac{(VA/kg)(B;f) G_{Fe} [kg]}{U_1} \quad \text{Siendo } G_{Fe} \text{ la masa del hierro del núcleo}$$

ESTUDIO DE I_h

Esta corriente es la debida a las pérdidas por histéresis y corrientes parásitas en el núcleo de Hierro del circuito magnético. Las pérdidas en el hierro se obtienen de las curvas suministradas por el fabricante en W/kg y en función de la inducción en Tesla. Esta "cifra de pérdidas en W/kg habrá que multiplicarla por los kg de masa del hierro G_{Fe} para obtener las pérdidas totales en Watt, (ver la Gráfica siguiente).-



Así $P_{Fe} = p_{fe} [W / kg] G_{Fe} [kg]$ y la corriente de pérdidas $I_h = \frac{P_{Fe} [W]}{U_{ln} [V]}$

Conclusiones

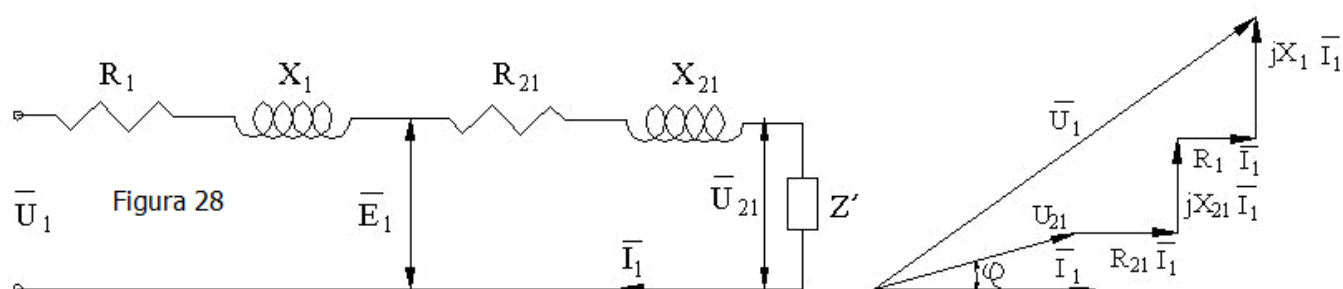
Por lo expuesto, cuando se estudia la corriente en vacío y sus componentes, se deduce la conveniencia de aumentar la sección de los yugos, porque de esta manera se disminuye B y, por consiguiente,

- la forma de onda es menos deformada y
- disminuyen las pérdidas

Circuito equivalente reducido y simplificado

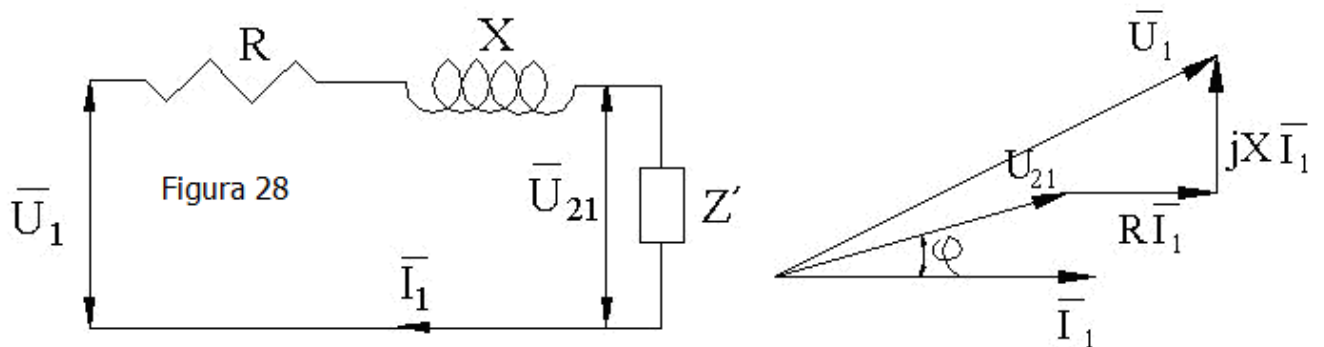
Si en la expresión: $\bar{I}_1 = \bar{I}_0 + \bar{I}_{21}$

Despreciamos I_0 , que hemos dicho es pequeña, queda: $\bar{I}_1 = \bar{I}_{21}$



Que desde el punto de vista del circuito, equivale a eliminar la rama que contiene a Z_0 , quedando entonces, el siguiente circuito y su correspondiente diagrama vectorial: Figura 28.-

Que si hacemos $R = R_1 + R_{21}$ y $X = X_1 + X_{21}$ nos queda:



Que serán en definitiva el circuito equivalente y diagrama vectorial de un transformador reducido, por estar referido a la malla del primario y simplificado, por prescindir de la corriente en vacío.

En la siguiente figura se muestra una estación transformadora aérea biposte con los descargadores, fusibles de exterior y transformadores de tensión e intensidad para medición.-

