

ELECTROTECNIA
TRANSFORMADORES

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" y "baja tensión", sin que esto implique necesariamente que el primario o secundario sea la alta tensión o viceversa.

Llamaremos núcleo del devanado o columnas del transformador a la parte del circuito magnético que posee arrollado el bobinado y yugos a las que no tienen arrollamiento alguno (Fig. 1)

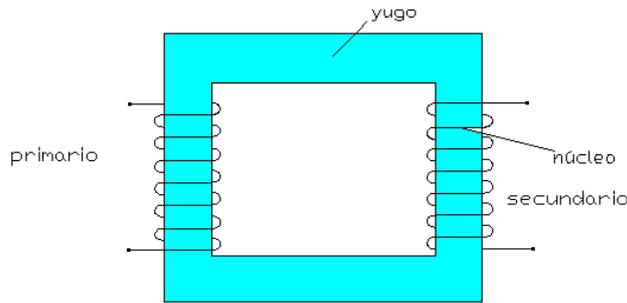


Figura 1

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

Tipos constructivos

Los tipos constructivos que se encuentran habitualmente son:

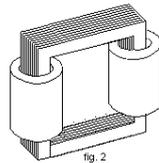
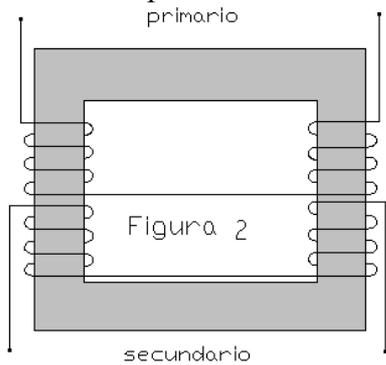


fig. 2

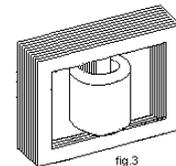
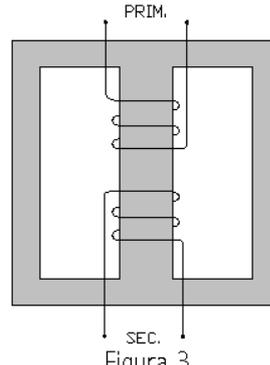


fig. 3

a) Transformador monofásico de columnas (Fig. 2)

b) Transformador monofásico acorazado (Fig. 3)

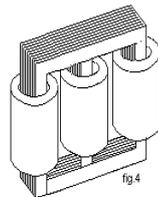
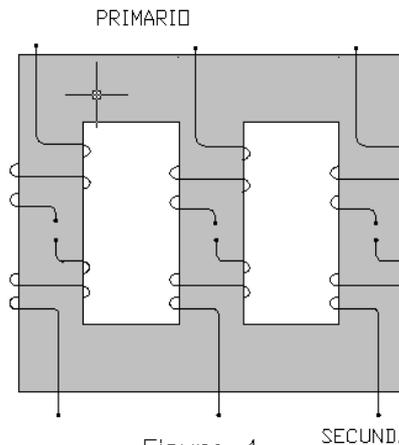


fig. 4

c) Transformador trifásico de columnas (Fig. 4)

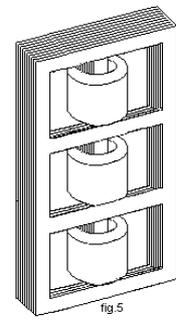
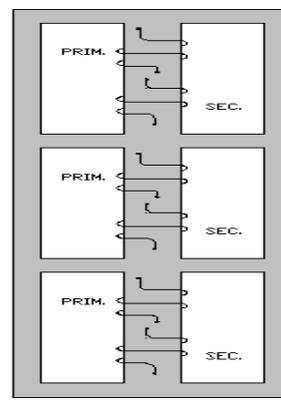


fig. 5

d) Transformador trifásico acorazado (Fig. 5)

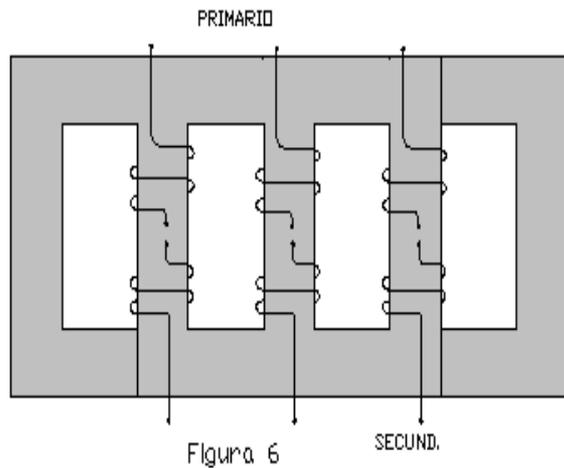


Figura 6

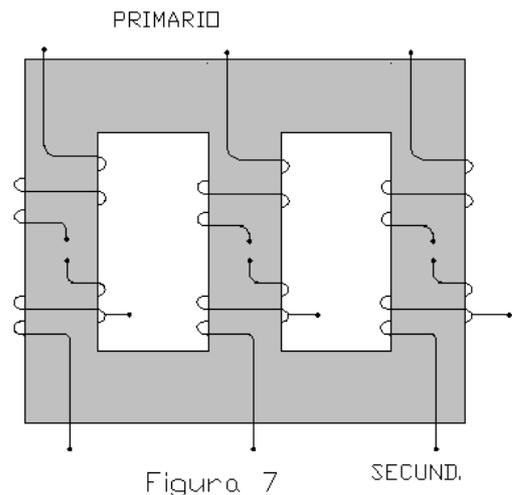
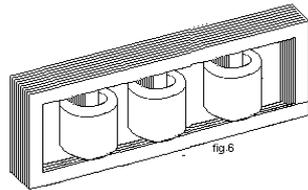


Figura 7

e) Transformador trifásico de cinco columnas (Fig. 6) f) Transformador trifásico-exafásico (Fig. 7)

Se observa que los diferentes tipos constructivos, tienen una parte común: un primario y un secundario sobre un mismo circuito magnético. Es por esto que, cualquiera sea el tipo de transformador, lo podemos estudiar como el de la Fig. 1.-

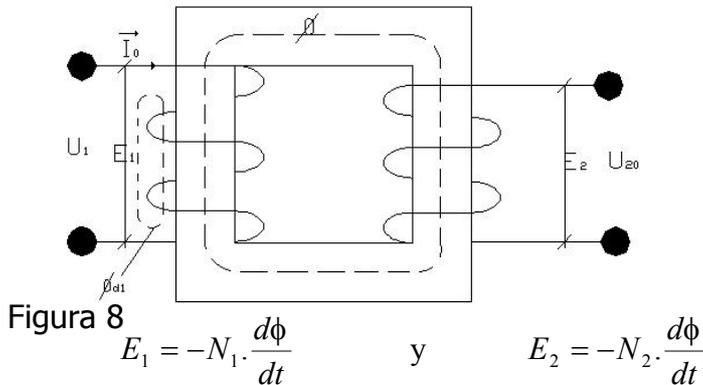
En lo que a material se refiere, los bobinados de todos los tipos de transformadores se realizan con hilos de cobre esmaltado, con objeto de conseguir un adecuado aislamiento eléctrico entre las espiras contiguas del arrollamiento. Generalmente se devanan el primario y el secundario apilados uno sobre otro aunque conservando la independencia entre devanados, empleándose para garantizar mejor aislamiento entre ellos, una o varias capas de papel encerado. Para obtener un aislamiento entre devanados muy alto, se utilizan carretes divididos en dos partes, alojando primario y secundario en éstos por separado.

Aplicaciones y ejemplos

(a) y (b) Los transformadores monofásicos, tanto de columnas como acorazados, se usan en distribución de energía eléctrica, por ejemplo para reducir, en líneas de MT de 13,2 kV a BT, 220 V. Se los suele encontrar, de pequeña potencia en soportes de líneas eléctricas rurales. También se los encuentra, en potencias altas, para constituir bancos trifásicos, con tres de ellos, en sistemas de distribución. Ejemplos: (a) 10 kVA ; 13200/220 V ; (b) 48 MVA - 225/15 kV ; (c) El trifásico de columnas es el más usado. Se lo encuentra desde pequeñas potencias (10 kVA) hasta muy grandes (150 MVA). Como elevadores de tensión en las centrales, reductores en las subestaciones, de distribución en ciudades, barrios, fábricas, etc. (d) El trifásico acorazado, debido a su gran robustez mecánica que lo hace soportar esfuerzos de cortocircuitos frecuentes, se usa para hornos eléctricos, por ejemplo : 13 MVA de 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. Ejemplo: 150 MVA de 225 kV/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 la rectificación industrial y en tracción eléctrica: subterráneos, tranvías, etc. Ejemplo: 13200/580 V.-

Principio físico de funcionamiento

Transformador en vacío:



Considerando al transformador como en Fig. 8, si le aplicamos una tensión U_1 , al primario, circulará una corriente I_0 , denominada de vacío.

Esta corriente que circula por 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.-

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, a las que llamaremos flujo disperso del primario ϕ_{d1} .

La Fem. E_2 se puede medir en vacío por lo que se le puede llamar también “tensión secundaria en vacío” $U_{20} = E_2$

Transformador en carga

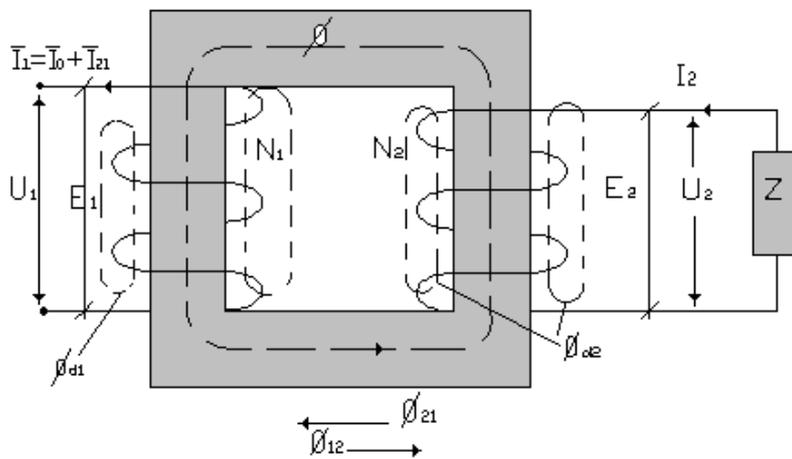


Figura 9

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 que llamaremos

I_{21} , corriente secundaria referida al primario al circular por las N_1 espiras, creará un flujo ϕ_{12} que se opone al que lo crea ϕ_{21} y en la misma medida.- 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 mas la secundaria referida al 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

$$L_1 = \frac{N_1 \cdot \Phi_{d1}}{I_1} \text{ y a su vez por la reactancia } X_l = \omega L_1 ; \text{ de la misma manera el secundario.}$$

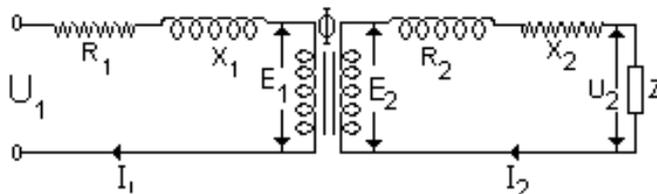


Fig. 10

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).

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: $\phi(t) = \Phi \text{ sen } \omega t$ siendo $\Phi = \phi_{max}$.

La Fem. inducida primaria será $e_1(t) = -N_1 \cdot \frac{d\phi}{dt} = -N_1 \omega \cdot \Phi \cdot \cos \omega t$ en atraso de 90° respecto a Φ . Y en notación simbólica será $E_1 = -j \omega N \Phi$

Su módulo será $|E_1| = N_1 \cdot \omega \cdot \Phi$; siendo módulo, es valor máximo y expresándolo en valor eficaz y explicitando f :

$$E_1 = \frac{2\pi}{\sqrt{2}} \cdot f \cdot N_1 \cdot \Phi = 4,44 \cdot f \cdot N_1 \cdot \Phi$$

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

$$E = 4.44 f \cdot N \cdot \Phi$$

Sus dimensiones $[V] = [Hz] [Wb]$

Podemos ahora trasladar al diagrama vectorial los vectores

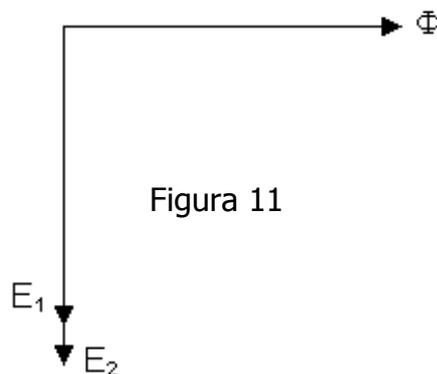


Figura 11

Φ función $(+ \text{sen } \omega t)$, E_1 y E_2 función $(- \text{cos } \omega t)$ (Fig. 11)

La Fem. E_1 es inducida por Φ en el primario.-
Si no existiesen las caídas en R_1 y X_l , por Kirchoff sería:

$$U_1 + E_1 = 0$$

ó

$$U_1 = - E_1$$

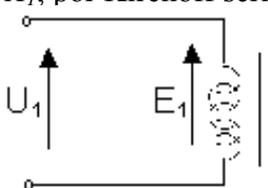
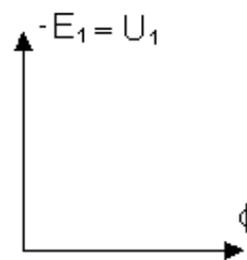


Figura 12



U.N.C.

ELECTROTECNIA

Es decir, la tensión aplicada contrarrestaría a la Fem. inducida, luego $-E_I$, es la componente de la tensión aplicada al primario, necesaria para vencer la Fem. inducida E_I en éste, por el flujo principal, igual y opuesta a ella.-(Fig.12)

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

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

Solución:

$$E = 4,44 f \cdot \Phi \cdot N$$
$$220 = 4,44 \cdot 60 \cdot \Phi \cdot N \quad \therefore \Phi \cdot N = 0,83$$

Como Φ y N no se pueden cambiar (al producto $\Phi \cdot N$ se lo llama “concatenaciones de flujo” o “flujo ligado”), para 50 Hz el segundo miembro será:

$$4,44 \cdot 50 \cdot 0,83 = 184 \text{ V}$$

Es decir, si se le aplicase 220 V > 184 V el núcleo se saturaría, calentaría y no obtendría la tensión esperada, de acuerdo a la relación de transformación.-

Conclusión: **No** puede funcionar a la misma tensión.-

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

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

En 60 Hz sería:

$$4,44 \cdot 60 \cdot 0,99 = 263 \text{ V}$$

Si se aplican 220 V < 263 V, tendrá menos flujo, menores pérdidas pero se mantiene la relación.-

Conclusión: **Sí** puede funcionar a la misma tensión.-

Tensión por espira:

De la Fem. $E = 4,44 f \cdot \Phi \cdot N$

Denominamos “tensión por espira” a la relación : $\frac{E}{N} = E_N = 4,44 \cdot f \cdot \Phi$ de donde,

para 50Hz se deduce $\Phi = \frac{E_N}{222}$ (1)

Sus dimensiones son: $[Wb] = \frac{[V \cdot s]}{[esp.]}$

La potencia aparente del transformador, prescindiendo de pérdidas y caída de tensión es:

$$S = E I = 4,44 f \cdot \Phi \cdot N I = 222 \Phi \cdot (N \cdot I) \text{ con } E = \text{Fem. eficaz e } I = \text{corriente eficaz.}$$

De $\Phi = NI \Lambda$ reemplazando (NI) en la anterior es: $NI = \frac{\Phi}{\Lambda}$

Obtenemos: $S = \frac{222\Phi^2}{\Lambda}$ que combinando con (1) $S = \frac{1}{222\Lambda} \cdot E_N^2$

Finalmente:

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

El valor de K, para 50hz, en pequeños trafos comprendido entre 3 y 900 VA, suele valer $0.02 \leq K \leq 0.027$. El K para trafos de tensiones medias (13.2 kV) y potencias comprendidas entre 10 y 10000 kVA, suele valer: $0.39 \leq K \leq 0.42$

Relación de transformación

Se denomina así a la relación de las Fem.: $\frac{E_1}{E_2} = n$ y sustituyendo las Fem. por sus expresiones

teóricas, ya vistas, se obtiene $n = \frac{E_1}{E_2} = \frac{N_1}{N_2}$ Expresión teórica, ya que la Fem. no se puede medir.

En la práctica, y con el transformador en vacío, se verifica:

$$E_1 \approx U_1$$

$$E_2 = U_{20}$$

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:

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

Fórmula práctica valida bajo ciertas limitaciones:

- 1°) Solamente para transformadores en vacío.-
 - 2°) Para valores eficaces y ondas senoidales.-
 - 3°) Para factores de forma no alteradas por la saturación del núcleo.
 - 4°) Independiente de la tensión de ensayo, pero no para valores muy superiores a los nominales para no saturar al núcleo, ni para tensiones muy bajas, pues adquieren relevancia las caídas de tensión por la corriente de vacío.
- Por ello, es válida para tensiones comprendidas entre el 70% y 100% de la nominal.

Corriente secundaria

Del circuito equivalente podemos escribir en valores eficaces: $I_2 = \frac{E_2}{Z_2'}$

Siendo Z_2' la impedancia total de la malla secundaria, incluyendo la carga $Z = R + jX$

$Z_2' = R_2 + jX_2 + Z$; Como vimos, el vector E_2 atrasa 90° respecto al flujo, luego se puede expresar como : $E_2 = -j \omega N_2 \Phi$

El vector I_2 será: $I_2 = \frac{-j\omega \cdot N_2 \cdot \Phi}{(R_2 + R) + j(X_2 + X)}$; su módulo $|I_2| = \frac{\omega \cdot N_2 \cdot \Phi}{\sqrt{(R_2 + R)^2 + (X_2 + X)^2}}$

Y su fase $\varphi_2 = \text{arc tg} \frac{X_2 + X}{R_2 + R}$

Tal que si suponemos una carga Z inductiva, estará en atraso un ángulo φ_2 respecto de E_2 y su valor instantáneo será: $i_2 = I_2 \text{ sen} [\omega t - (\pi / 2 + \varphi_2)]$

Ejemplo: Dado un transformador de 100KVA; 13200/400 – 231V trifásico, conexión Δ Y , determinar:

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

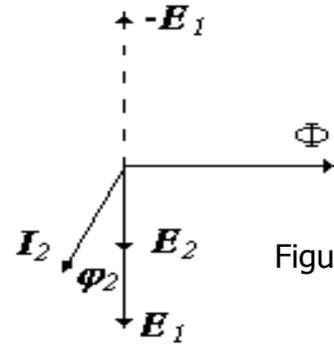


Figura 13

Solución: 1°) Usamos la expresión: $E_N = K\sqrt{P}$; Adoptamos para $K = 0,4$, luego

$$E_N = 0,4\sqrt{100} = 4V / \text{esp}$$

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

3°) La sección del circuito magnético: $\Phi = SB$; $S = \frac{\Phi}{B} = \frac{0,018}{1,7T} = 0,0106 \text{ m}^2 = 106 \text{ cm}^2$

adoptando para la inducción: $B = 1,7 \text{ T}$

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

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

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

Tensión secundaria

Conociendo I_2 , será: $U_2 = Z I_2 = R I_2 + j I_2 X$ y la fase: $\varphi = \text{arc tg} \frac{X}{R}$

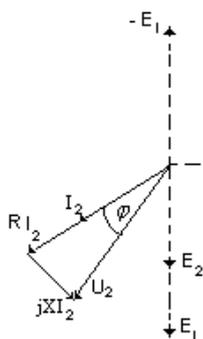


Fig. 14

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

$R I_2$, en fase con I_2 y $j I_2 X$, en cuadratura y adelanto con I_2 , su suma vectorial dará: U_2 (Fig.14)

Caídas de tensión internas del secundario

En el circuito equivalente, se observa que

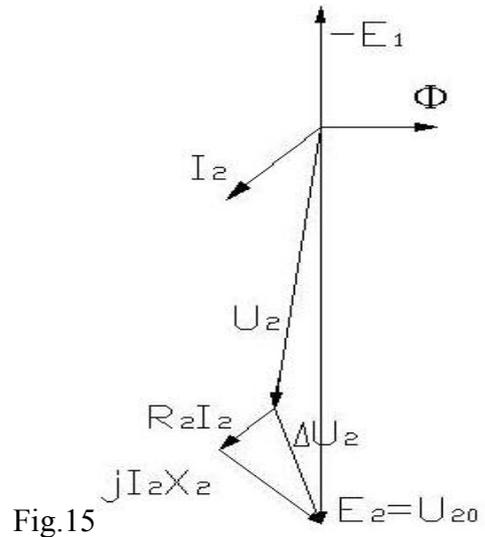
E_2 debe equilibrar las caídas ohmicas en R_2 e inductiva en X_2 , mas la tensión, es decir:

$$E_2 = R_2 \cdot I_2 + j \cdot X_2 \cdot I_2 + U_2$$

Estas caídas están en fase y cuadratura, respectivamente con I_2 , lo que nos permite trasladarlas al diagrama vectorial (Fig. 15).

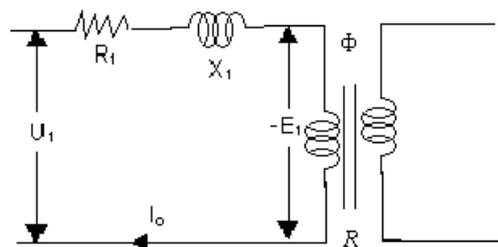
La caída interna del secundario, es la diferencia vectorial: $\Delta U_2 = E_2 - U_2 = U_{20} - U_2$

$$\Delta U_2 = R_2 \cdot I_2 + j X_2 \cdot I_2$$



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

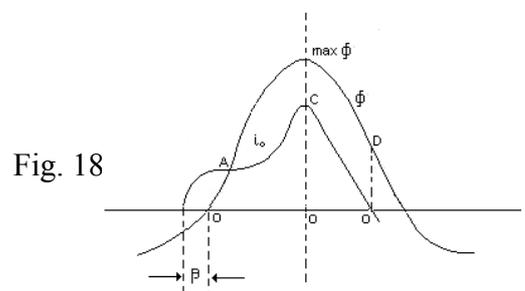
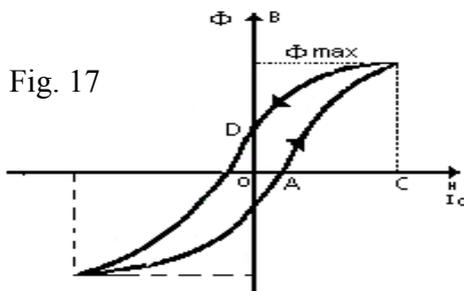
Corriente de vacío: El circuito equivalente del transformador en vacío es:



La ecuación de equilibrio: $U_1 = R_1 \cdot I_0 + j \cdot X_1 \cdot I_0 - E_1$ 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; es éste, en última instancia, quien determina la forma y fase de I_0 .

Trazando el ciclo de histéresis (Fig. 17) y una onda de ϕ como referencia (Fig. 18).



Se deduce que, cuando el $\phi = 0$ (punto O) la corriente en vacío vale OA, cuando $\phi = \Phi_{max}$, $I_0 = OC$; cuando $\phi = OD$ $I_0 = 0$. Llevamos estos valores a la (Fig. 18) se obtiene la curva de I_0 .

Conclusiones:

1°) La onda de corriente en vacío I_0 no es senoidal, debido a la presencia del hierro en el circuito magnético.

2°) La corriente de vacío I_0 adelanta un ángulo β respecto del flujo (Fig.19), y el diagrama vectorial del transformador en vacío (Fig.20) teniendo en cuenta el circuito equivalente y la ecuación de equilibrio es:

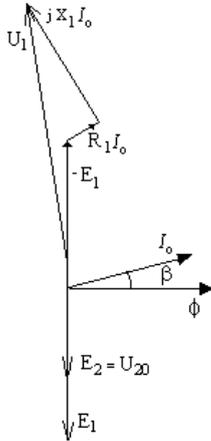


Fig.20

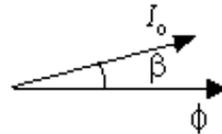


Fig.19

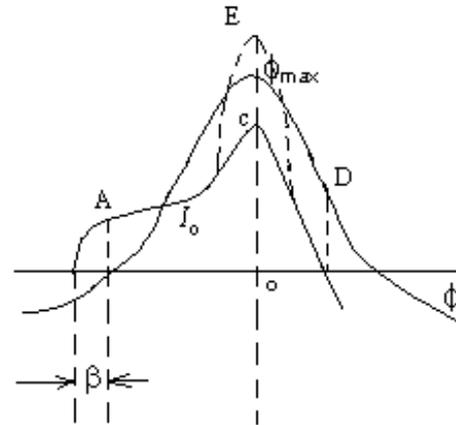


Fig.21

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

Fuerza magnetomotriz total :

Al conectar el secundario a la carga Z , aparece I_2 , cuya fmm $N_2 I_2$ se opone a la causa que lo produce, tendiendo a debilitar el flujo del núcleo, y por consiguiente tiende a disminuir E_1 , lo cual hace crecer la corriente en el primario produciendo una fmm $N_1 I_1$ 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: Flujo en vacío = flujo en carga es lo mismo que escribir:

$$N_1 I_0 = N_1 I_1 + N_2 I_2$$

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 $U_1 = R_1 I_0 + j X_1 I_0 - E_1$, en carga I_0 crece hasta I_1 luego aumentan las caídas $R_1 I_0$ y $X_1 I_0$, y como $U_1 = \text{cte.}$, E_1 disminuye y por consiguiente disminuye el flujo según $E_1 = 4.44 f \Phi N_1$

resulta:

$$\Phi = \frac{E_1}{4.44 \times f \times N_1}$$

Esto se puede imaginar en el diagrama vectorial haciendo $U_1 = \text{cte.}$ y haciendo crecer los vectores $R_1 I_0$ y $X_1 I_0$, se ve que E_1 disminuye.

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

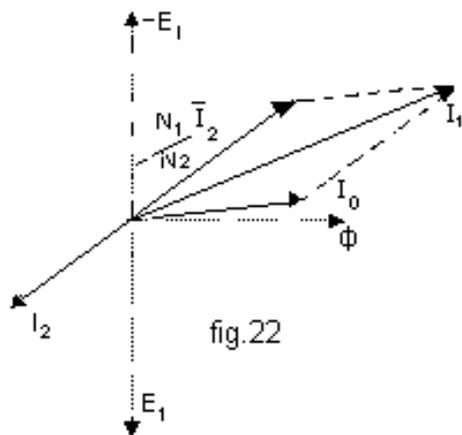
Corriente primaria:

De la ecuación del circuito magnético:

$$N_1 \cdot \bar{I}_0 = N_1 \cdot \bar{I}_1 + N_2 \cdot \bar{I}_2 \quad \text{dividiendo por } N_1 \text{ y despejando } \bar{I}_1$$

$$\bar{I}_1 = \bar{I}_0 + \left(-\frac{N_2}{N_1} \right) \bar{I}_2$$

Lo que nos dice que al vector I_0 que ya tenemos en el diagrama vectorial, le debemos sumar el vector opuesto a I_2 multiplicado por N_2/N_1 para obtener I_1 (Fig.13)



Tensión primaria:

Del circuito de la malla de primario, se obtiene su ecuación de equilibrio que es: $U_1 = R_1 I_1 + j X_1 I_1 - E_1$

Lo que nos dice que, al vector E_1 que tenemos en el diagrama vectorial, le tenemos que sumar $R_1 I_1$ en fase con I_1 más $X_1 I_1$ en cuadratura y adelanto (+j) con I_1 para obtener U_1 . El desfase entre tensión y corriente primaria es ϕ_1 . (Fig.23)

Valores reales:

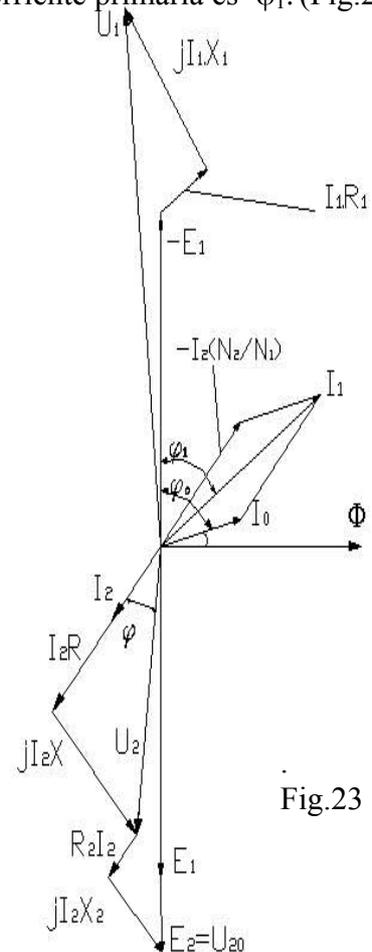
Como se recordará, se partió del supuesto que conocíamos Φ como dato, cuando en realidad es más correcto partir de U_1 . Por lo tanto, para obtener el diagrama vectorial con sus valores reales, bastará con cambiar la escala con que se trazó el mismo, en la relación U_1 diagrama/ U_1 dato.

Conclusiones:

Observando el diagrama completo:

- 1°) El defase entre la corriente de entrada I_1 y la de salida I_2 es de casi 180° (el que no sea 180° es por el Fe).
- 2°) Un trafo conectado a una línea empeora él $\cos \phi$, en el diagrama vemos que $\phi_1 > \phi$
- 3°) En los trafos de medición, aparecen errores de relación y de ángulo. En los de intensidad el error de relación I_1/I_2 es debido a I_0 y el de ángulo a que el defasaje no es exactamente 180°

En los de tensión el error de relación U_1/U_2 es debido a caídas internas y el error de ángulo del defasaje entre U_1 y U_2 .



4°) El trafo de intensidad no debe trabajar en vacío. Por alimentar un amperímetro ($R_A \ll$) trabaja normalmente en corto. $\therefore R_1 I_1$ y $X_1 I_1$ son grandes, y ϕ y $-E_1$ son pequeños. Al pasar a trabajar en vacío la corriente disminuye $I_0 \ll I_{cc}$

$\therefore R_1 I_0$ y $X_1 I_0$ disminuyen, y crece $-E_1$ pues $U_1 = cte$

y como se trabaja con bajas inducciones para que sea lineal, el flujo puede crecer mucho aumentando las tensiones, lo que puede perforar aislantes, saturar el núcleo y calentar el hierro.

5°) Además se observa que $\phi_0 \gg \phi_1$ por lo cual en vacío $\cos\phi$ es muy bajo ≈ 0.1

6°) De la expresión $N_1 I_0 = N_1 I_1 + N_2 I_2$ considerándolo a plena carga y despreciando la corriente en vacío I_0 , queda: $N_1 I_1 = N_2 I_2$, que con la relación de transformación podemos

escribir : $\frac{N_1}{N_2} = \frac{I_2}{I_1} = \frac{U_1}{U_{20}}$ relación entre tensiones, espiras y corrientes de uso práctico

Reducción del circuito equivalente a la malla del primario o secundario

Estudiamos primeramente la reducción al primario.

De la expresión: $N_1 I_0 = N_1 I_1 + N_2 I_2$ (1)

dividiendo por N_1 : $I_0 = I_1 + \left(\frac{N_2}{N_1}\right) I_2$ y despejando I_1 : $I_1 = I_0 + \left(-\frac{N_2}{N_1}\right) I_2$

$$I_1 = I_0 - \frac{I_2}{n}$$

llamando $I_{21} = -\frac{N_2}{N_1} I_2$ (2) corriente secundario referida al primario, queda:

$$\begin{aligned} I_1 &= I_0 + I_{21} \\ \text{O bien: } I_0 &= I_1 - I_{21} \end{aligned} \quad (3)$$

O sea, 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 que haga circular I_0 en desviación.

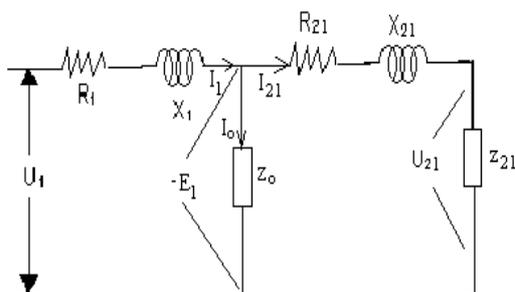


Fig.24

Como antes $E_1 \neq E_2$; y ahora deberá ser $E_1 = E_2$ para mantener las mismas condiciones. Luego en la malla secundaria habrá que variar R_1 , X_2 , Z y U_2 es decir determinar los nuevos valores de los parámetros referidos al primario ; R_{21} , X_{21} , Z_{21} , U_{21} e I_{21} .

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

De la ecuación de equivalencia del secundario, en el circuito equivalente era:

$$I_2 = \frac{E_2}{R_2 + j.X_2 + Z}$$

reemplazando $E_2 = \frac{E_1}{n}$, dividiendo miembro a miembro. por $n \left(n = \frac{N_1}{N_2} \right)$

y teniendo en cuenta la (2) $I_{21} = -\frac{N_2}{N_1}.I_2$, queda: $\frac{I_2}{n} = \frac{E_1}{n^2.R_2 + j.n^2.X_2 + n^2.Z} = -I_{21}$

La ecuación de equilibrio para el secundario en el circuito equivalente reducido es:

$$I_{21} = \frac{-E_1}{R_{21} + jX_{21} + Z_{21}} \text{ y para que ambas sean iguales, deberá ser:}$$

$$\left. \begin{array}{l} U_{21} = n U_2 \\ I_{21} = \frac{1}{n}.I_2 \end{array} \right\} \begin{cases} R_{21} = n^2 R_2 \\ X_{21} = n^2 X_2 \\ Z_{21} = n^2 Z \end{cases}$$

Reducción a la malla del secundario

En algunos casos, en el estudio de trafos en paralelo, es más conveniente estudiar la máquina como circuito reducido al secundario, en cuyo caso los factores de reducción son inversos.

Resumen	Factores de reducción	
	Al Primario	Al Secundario
Impedancias y sus componentes	n^2	$\frac{1}{n^2}$
Tensiones	n	$\frac{1}{n}$
Corrientes	$\frac{1}{n}$	n

Potencia del circuito magnético

En el trafo, el circuito magnético recibe energía a través del arrollamiento primario y lo transforma al secundario a manos de las pérdidas lógicas de toda conversión de energía (en este caso en el Fe).

$$\begin{array}{ccc} \text{Energía eléctrica} & \Rightarrow & \text{Energía Magnética} & \Rightarrow & \text{Energía Eléctrica} \\ \text{(en el primario)} & & \text{(en el hierro)} & & \text{(en el secundario)} \end{array}$$

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:

$$S = E_1 I_1 = E_2 I_2 .$$

Partiendo de $E = 4.44 f \Phi N$ y sabiendo que:

A_{Cu} = Área cobre

A_{Fe} = Área hierro

δ = densidad de corriente

se deduce que la potencia aparente por fase resulta:

$$S = 2,22 f \cdot B \cdot A_{Cu} \cdot A_{Fe} \cdot \delta$$

en unidades SI.

Esta fórmula sirve para determinar la potencia de un transformador desconocido o para calcular, teniendo solo el núcleo, qué trafo se puede construir a partir de él.

Ejemplo:

Verificar la potencia del circuito magnético de un transformador trifásico de 63 KVA; 13200/400-231 V.; ΔY del que se disponen de los siguientes datos: devanado de BT.: 52 espiras de 2//3x6mm; devanado. de AT 2972 espiras d = 0,90mm; sección neta del hierro: $A_{Fe} = 1,32 \text{ dm}^2$.-

-tensión por espira: $E_n = \frac{231V}{52esp} = 4,442V / esp$

-flujo: $\Phi = E_N / 222 = 4,442 / 222 = 0,02 \text{ Wb}$

-inducción : $B = \Phi / A_{Fe} = 0,02 \text{ Wb} / 1,32 \cdot 10^{-2} \text{ m}^2 = 1,5 \text{ T}$

-corriente y densidad primaria: $I_1 = 63/3 \cdot 1,32 = 1,59A; \delta_1 = 1,59A / 0,636 \text{ mm}^2 = 2,5A / \text{mm}^2$

-corriente y densidad secundaria: $I_2 = 63/3 \cdot 0,22 = 95,45A; \delta_2 = 95,45A / 36 \text{ mm}^2 = 2,65A / \text{mm}^2$

-densidad media: $\delta = \delta_1 + \delta_2 / 2 = \frac{2,5 + 2,65}{2} = 2,57A / \text{mm}^2$

-área cobre secundaria: $A_{Cu2} = 52 \cdot 2 \cdot 3 \cdot 6 = 1872 \text{ mm}^2$

-área cobre primaria: $A_{Cu1} = 2972 \cdot 0,636 = 1890 \text{ mm}^2$

-área cobre total: $A_{Cu} = 1872 + 1890 = 3762 \text{ mm}^2$

-potencia del circuito magnético: $S = 3 \cdot 2,22 \cdot f \cdot B \cdot A_{Fe} \cdot A_{Cu} \cdot \delta$

- $S = 6,66 \cdot 50 \cdot 1,5 \cdot 1,32 \cdot 10^{-2} \cdot 3762 \cdot 10^{-4} \cdot 2,56 \cdot 10^6 = 63,74 \text{ KVA}$

Transformador en vacío

Con el transformador en vacío, no trabaja la malla del secundario, por consiguiente, el circuito equivalente (Fig.25) y el diagrama vectorial (Fig.26) quedan

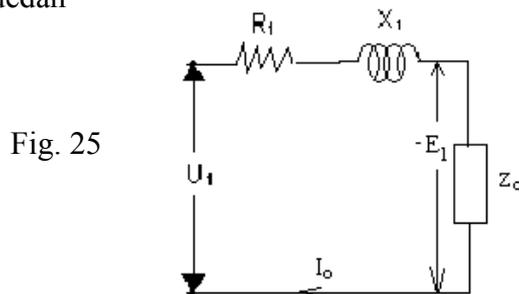


Fig. 25

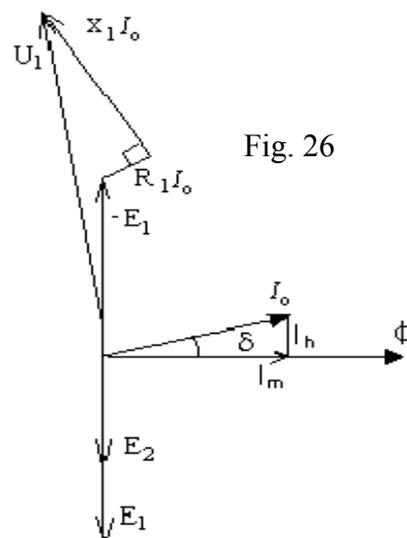


Fig. 26

Del circuito equivalente:
$$I_0 = -E_1 / Z_0 = -E_1 Y_0$$

$$I_0 = -E_1 (G_0 - j B_0) = -E_1 G_0 - j (-E_1) B_0$$

de las proyecciones de I_0 en el diagrama vectorial

$$I_0 = I_h + I_m$$

Denominaremos corriente histerética I_h , a la componente en fase con $-E_1$, que es la que disipa calor en el núcleo(es debida a las pérdidas por histéresis y corrientes parásitas); 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:

$$I_h = -E_1 G_0 = -E_1 / R_0$$

$$I_m = -j (-E_1) B_0 = -E_1 / j X_0$$

Al tener una corriente en fase que produce calor, el parámetro eléctrico que lo representa es una R_0 ; en cuadratura, queda representado por una X_0 .

Por consiguiente Z_0 será (Fig.27):

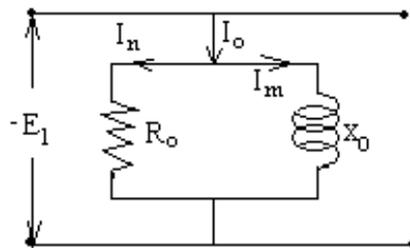


Fig.27

Se deduce: módulo: $|I_0| = \sqrt{I_n^2 + I_m^2}$

En % de I_1 : $I_0 \% = I_0 / I_1 \cdot 100$

Fase: $\cos\phi_0 = \frac{P_0}{U_1 \cdot I_0}$; siendo P_0 = potencia absorbida en vacío.

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