ELECTROTECNIA
TRANSFORMADORES

Estudio de I_m

Dado el circuito magnético del transformador, se podría calcular los amperios-vueltas máximos necesarios para excitarlo, sumando las tensiones magnéticas en el núcleo, yugo y entrehierro, según la expresión: $N_1 I_m = \sum H_i l_i = H_n l_n + H_y l_y + H_e l_e$

Como la $N_1 I_m$ está en valores máximos, ya que se calcula a partir de la intensidad de Campo Magnético H, los cuales surgen del flujo máximo Φ, para obtener la I_m en valor eficaz, se debe dividir por el factor de amplitud $K = I_{max} / I_{RMS}$, del cual algunos valores se indican en el cuadro en función del valor de inducción B empleado:

B_{max} [T]	1	1,2	1.4
K	1.70	1.90	2.35

Los valores de H se obtienen delas curvas $B = f(H)$, suministrado por el fabricante de las chapas magnéticas.

Luego la corriente eficaz magnetizante, por fase, será: $I_m = \dfrac{\sum H_i l_i}{K.N_i}$

Como es difícil apreciar la longitud del entrehierro (l_e), los valores obtenidos por este método, son poco aproximados.

De no poseer la curva $B = f(H)$, y si la de "inducción en función de la excitación", (en VA eficaces en vacío por kg de masa de hierro), $B = f(VA/kg)$ la I_m se obtiene de: $I_m = \dfrac{(VA)_m .G}{U_1}$

siendo G el peso del entrehierro.

Estudio de I_h

Las pérdidas en el hierro debido a histéresis y corrientes parásitas se obtienen de las curvas de "inducción en función de las pérdidas" en [W/kg] : $B = f(W/kg)$. Las pérdidas totales se obtienen de: $P_h = P_{fe}$ *[W/kg] x G[kg]* siendo G el peso del hierro,

y la corriente: $I_h = \dfrac{P_h}{U_{1n}}$ donde U_{1n} es la tensión nominal del primario

Por ello cuando se estudia la corriente de vacío I_0 y sus componentes I_h e I_m, se deduce la conveniencia de aumentar la sección de los yugos, porque de esa manera se disminuye B y, por consiguiente:

1. La forma de onda de I_0 es menos deformada
2. Disminuyen las pérdidas

Circuito equivalente reducido y simplificado

Si en la expresión: $\overline{I_1} = \overline{I_0} + \overline{I_{21}}$ despreciamos I_0 ,que es pequeña, queda $\overline{I_1} = \overline{I_{21}}$, 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 (Fig.29 y 30):

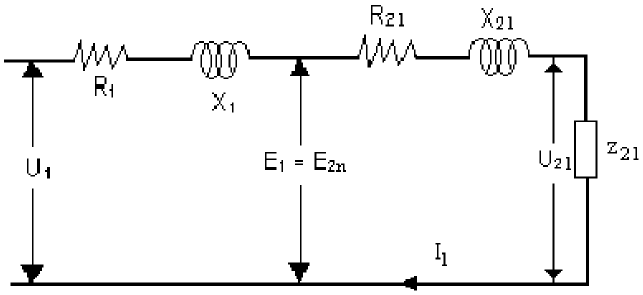

Fig.29

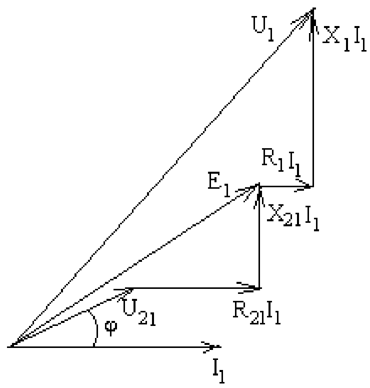

Fig. 30

Haciendo $R = R_1 + R_{12}$ y $X = X_1 + X_{12}$, quedarán (Fig.31 y 32):

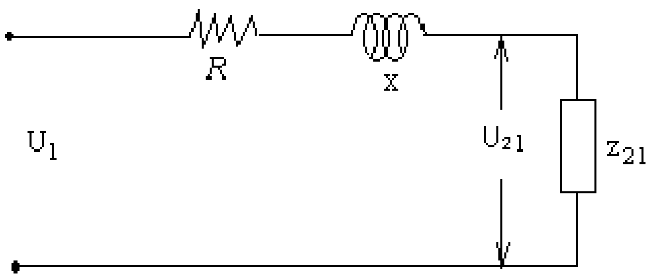

Fig. 31

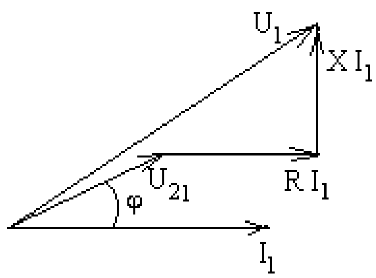

Fig. 32

Que será, 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 de vacío.

Variación de la tensión con la carga

También llamada regulación.

La norma IRAM. CEAF. 20-99 la define como “la diferencia entre la tensión secundaria nominal y la tensión secundaria bajo carga. Se expresa en % de la tensión nominal del arrollamiento de que se trata”.

Por consiguiente es: $\Delta U\% = \frac{U_{20} - U_2}{U_{20}}.100$

Esta expresión, en función del circuito equivalente será, teniendo en cuenta que en vacío la tensión a los bornes de salida es U_1, y en carga U_{21}: $\Delta U\% = \frac{U_1 - U_{21}}{U_1}.100$

Estas expresiones son iguales, ya que remplazando en la primera $U_{20} = U_1.\frac{N_2}{N_1}$,

multiplicando y dividiendo por $\frac{N_1}{N_2}$ y operando se obtiene la segunda.

La fórmula mencionada solo sirve para determinar la variación de tensión en un transformador en servicio ó de pequeños transformadores que se puedan cargar, ya que se debe poder medir U_2.

Cuando se desea calcularla, en la etapa de proyecto, o determinarla en laboratorio en máquinas de gran potencia, no se puede usar la anterior. Entonces se recurre a la expresión:

$$\Delta U\% = U_R\% \cos \Phi + U_X\% \operatorname{sen} \Phi$$

donde:

$U_R\%$ = caída ohmica porcentual
$U_X\%$ = caída reactiva porcentual
$\cos \varphi$ = es el factor de potencia de la carga., el cual como puede no conocerse, se estima.

Transformador en cortocircuito

Teóricamente, si se cortocircuitasen todos los bornes del secundario de un transformador, estando conectado el primario a su plena tensión (ver ilustración) absorbería una elevada corriente que denominaremos "corriente de cortocircuito permanente" I_{ccp}. El circuito y diagrama vectorial serían en tal caso los de las Fig. 33

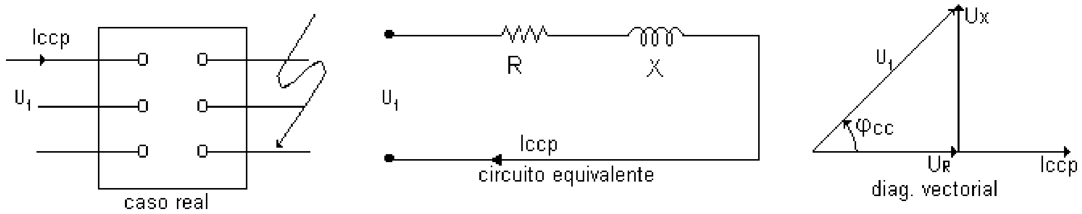

Fig.33

Del circuito equivalente deducimos la corriente de corto circuito permanente: $I_{ccp} = \dfrac{U_1}{\sqrt{R^2 + X^2}}$

y la impedancia de cortocircuito $Z_{cc} = \sqrt{R^2 + X^2}$

De aplicar este caso a la realidad, sería ***destructivo*** para la máquina.
En la ***práctica*** se procede de la siguiente manera:

Se cortocircuitan los bornes de un arrollamiento; se aplica tensión variable a los bornes del otro arrollamiento; en el que hemos conectado vatímetros, voltímetro y amperímetro (Fig.34) Se aumenta la tensión hasta que el amperímetro indique la corriente nominal I_n de dicho arrollamiento, se leen la tensión y la potencia.

La tensión que indica el voltímetro se denomina ***"tensión de cortocircuito"***. La norma IRAM define como tensión de cortocircuito " *la tensión a frecuencia nominal que debe aplicarse entre los bornes de línea de un arrollamiento, para que por él circule la corriente nominal, cuando los bornes del otro arrollamiento están en cortocircuito".* Su valor está referido a 75º C para las clases de aislación A, E y B y 115º C para las F y H ".

El circuito equivalente y diagrama vectorial en tales condiciones serán (Fig.34):

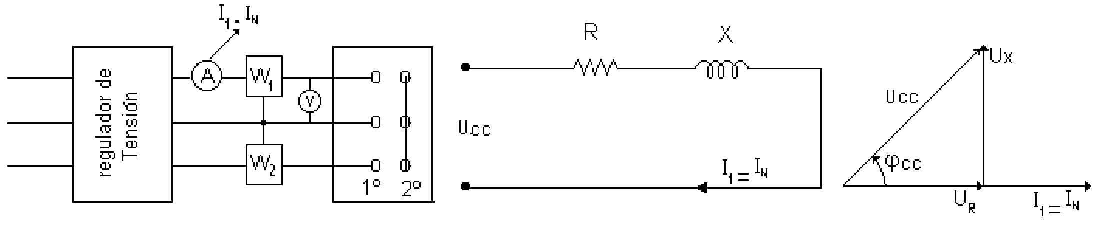

Fig.34

Normalmente la tensión de cortocircuito no se expresa en (V) sino porcentualmente:

$$u_{cc\%} = \frac{U_{cc}}{U_1} x100 \qquad (1)$$

Es creciente con la potencia, algunos valores indicativos:

S (KVA)	100	1000	10000	80000
U_{cc}%	4	6	9	12

La indicación de los vatímetros, están midiendo las pérdidas en cortocircuito, P_{cc}, es decir: $W_1 \pm W_2 = P_{cc} = \sqrt{3}\, U_{cc}\, I_n \cos\varphi_{cc}$

De esta expresión se puede deducir $\cos\varphi_{cc}$ y resolviendo el diagrama vectorial (Fig.34) podemos determinar las caídas óhmicas U_R e inductiva U_X

Conclusiones:

1) Suponiendo una variación lineal se deduce I_{ccp}

$U_{cc} \rightarrow I_n$

$U_n \rightarrow I_{ccp}$ $\qquad I_{ccp} = \dfrac{U_n\, I_n}{U_{cc}}$ despejando $u_{cc\%}$ en (1) y reemplazando en la anterior queda:

$$I_{ccp} = \frac{I_n}{u_{cc\%}} x100$$

Ejemplo: Un transformador con $u_{cc\%} = 4$ tiene una $I_{ccp} = 25$ veces la I_n y como los esfuerzos crecen proporcional al cuadrado, estos ascienden a 625 veces los nominales.

2) Se determinan las pérdidas en los devanados: los vatímetros miden $P_{cc} = R_{cc}\, I^2 + P_o$ pero las pérdidas en el hierro son despreciables en este ensayo, por lo pequeño del flujo, por consiguiente, en la práctica se considera

P_{cc} = pérdidas en los arrollamientos

3) Se pueden calcular U_R , U_X y U_Z : multiplicando y dividiendo por I_1 la expresión de $U_{R\%}$ queda: $U_{R\%} = \dfrac{RI_1}{U_1}100 = \dfrac{R\, I_1^2}{U_1 . I_1}100 = \dfrac{Pcc}{S}100$

lo que nos dice : "la caída óhmica porcentual es igual a la pérdida porcentual de potencia en los arrollamientos".

La caída porcentual por impedancia será: $U_{Z\%} = \dfrac{Z_{cc}\, I_1}{U_1}.100 = \dfrac{U_{cc}}{U_1}.100$

Y de las anteriores deducimos: $U_{X\%} = \sqrt{U_{Z\%}^{\;2} - U_{R\%}^{\;2}}$

4) La $u_{cc\%}$, en carga reducida, varía proporcionalmente a esta:

$$u_{cc\%} parcial = u_{cc\%} no\min al. \frac{I}{I_n} = u_{cc\%} no\min al. \frac{S}{S_n}$$

Ej.: Transformador 500 KVA; $u_{cc}\% = 4$ cuando esté cargado solamente con 400 KVA, tendrá una

$$u_{cc\%} \text{ parc} = 4\% \frac{400\ KVA}{500\ KVA} = 3{,}2\ \%$$

5) Se determina la variación de tensión conocidas $U_{R\%}$ y $U_{X\%}$

$$\Delta U\% = U_{R\%} \cos\varphi + U_{x\%} sen\ \varphi$$

6) Se obtiene la impedancia de cortocircuito $Z_{cc} = \dfrac{U_{cc}}{I_n}$

7) Por este procedimiento se efectúa el ensayo de calentamiento Como en estas condiciones los devanados disipan el mismo calor que si estuviesen a plena carga, se puede determinar la sobre elevación de temperatura que tendrá la máquina.

APLICACIONES

Además de las indicadas

1) La tensión de cortocircuito sirve para la conexión en paralelo de transformadores.

2) La corriente de cortocircuito se usa para la selección adecuada de las protecciones.

3) Tensiones de c.c. del orden del 4% son preferidas en sistemas de distribución, en orden de mantener caídas de tensión bajas.
En sistemas industriales de alta potencia son convenientes u_{cc} del 6% en consideración de su influencia en los esfuerzos de c.c. en. los equipos.

Pérdidas en el hierro P_{Fe}

Las pérdidas por corrientes parásitas. $P_{paras.} = \dfrac{\pi^2 . f^2 . B_m^2 . a^2 . V}{6.\rho}$ con :

a = espesor de las láminas
V = volumen del hierro
ρ = resistividad del hierro

donde se observa la importancia de usar chapas de pequeño espesor y alta resistividad (Fe - Si)

Las pérdidas por <u>histéresis</u> son proporcionales a la superficie del ciclo de histéresis, por eso la conveniencia de usar materiales de ciclo angosto.

Energía del Ciclo $W = \int \overline{H}.\overline{dB}$ V = volumen

Los fabricantes de chapas magnéticas suministran las curvas $f\,(W/kg)_B$. en que se indican las pérdidas unitarias totales para cada valor de B. Por tanto las pérdidas totales son:

$P_n = G_{Fe}\ (W/kg)_B.\ k$ con: G_{Fe} = peso del hierro en kg.

$(W/kg)_B$ = pérdidas unitarias a la inducción de trabajo
k = factor de aumento por manipuleo mecánico
$k \approx 1.15$

Pérdidas en los devanados

Son las debidas al efecto Joule en los arrollamientos, también llamadas pérdidas en cte. continua.

Genéricamente es: $P_{c\,c} = R\, I^2$

Llamando a:

δ = densidad de corriente (A/mm^2)
P_e = peso específico del conductor (kg$_f$ / dm^3)
ρ = resistividad a 75°C(Ω mm^2 / m)
l = longitud del conductor [m]
G = peso del conductor [N]

S = sección [mm^2]

Siendo: $I = \delta . S$

Será: $P_{cc} = R.I^2 = \dfrac{\rho.l}{S}.\delta^2.S^2 = \rho.l.\delta^2.S[W]$ y el peso del hierro $G = l.S.P_e[N]$

Las pérdidas por unidad de peso (*unitarias*) resultan en el SI: $p_{cc} = \dfrac{\rho.l.\delta^2.S}{l.S.P_e} = \dfrac{\rho.\delta^2}{P_e}\left[W/N\right]$

Y las pérdidas totales: $P_{cc} = \dfrac{\rho.\delta^2}{P_e}.G_{Fe}[W]$

Para el cobre, en que:

P_e = 8900 kg/m^3

ρ_{75} = 0,0217 (Ω mm^2 / m)

será: $P_{cc} = 2{,}44\ \delta^2\ G_{Fe}$

Teniendo en cuenta los aumentos por pérdidas adicionales, el factor pasa a valer 2,66, luego:

$$\boxed{P_{cc} = 2{,}66\ \delta^2\ G_{Fe}}$$

Para el aluminio triple E (especial para transformadores):

P_e = 2700 kg/m^3

ρ_{75° = 0,037 (Ω mm^2 / m)

P_{cc} = 13,7 δ^2 G_{Fe}

Rendimiento

En general es: $\eta\% = \dfrac{P_2}{P_1}100$

En esta expresión no se encuentra en forma explicita como varía el η en función del *cos* φ de la carga ni en función de los posibles estados de carga del transformador.

Considerando a: $P_1 = P_2 + P_o + P_{cc}$

$$\eta\% = \frac{P_2}{P_2 + P_o + P_{cc}}.100 = \left(1 - \frac{P_o + P_{cc}}{P_2 + P_o + P_{cc}}\right).100 = \frac{S\cos\varphi}{S.\cos\varphi + P_0 + P_{cc}}.100 \quad (1)$$

denominando al estado de carga por un factor de carga $K_c = \dfrac{I}{I_n} = \dfrac{S}{S_n}$ la potencia de salida será

$$P_2\ (kW) = K_c\ S_n\ (kVA)\ cos\ \varphi, \qquad (2)$$

-las pérdidas en vacío son independientes del estado de carga

$P_o = cte.$ (Fig.. 34) (3)

-las pérdidas en c.c. a plena carga son: $P_{cc} = R.I^2_n$ y para cualquier estado de carga serán:

$$P_{cc} = R_{cc}.I^2_{cc} = K^2_c.R_{cc}.I^2_n = K^2_c.P_{ccn} \ (4)$$

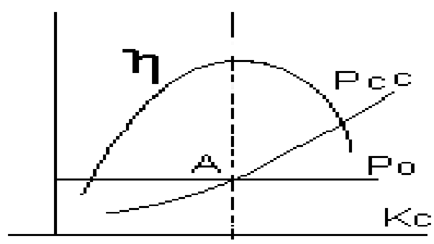

fig.34

Reemplazando (2),(3) y (4) en (1)

$$\eta\% = \frac{K_c.S_n.\cos\varphi}{K_c.S_n.\cos\varphi + P_0 + K^2_c.P_{ccn}}.100$$

El máximo η_{max} para *cos* φ = *cte* será cuando $\frac{\partial \eta}{\partial K_c} = 0$, que resulta para cuando $P_o = K_c^2 P_{cc}$

El η es máximo cuando las pérdidas en vacío son iguales a las de c.c (punto A, Fig. 34) a determinado estado de carga, o también, el η alcanza un máximo cuando está a la carga $K_c = \sqrt{\frac{P_0}{P_{cc}}}$