

PRÁCTICA Nº 8
ENSAYOS
DEL TRANSFORMADOR DE POTENCIA

PRÁCTICA N° 8

ENSAYOS DEL TRANSFORMADOR DE POTENCIA.

OBJETIVO

Con el ensayo de las máquinas se tiende a evitar en lo posible las pruebas directas con carga efectiva, por la dificultad que presenta el disponer de elementos capaces la absorber la potencia normal de la máquina.

Las características en carga se deducen de los ensayos en vacío y en cortocircuito, mediante la aplicación posterior de las teorías que relacionan estos valores con los de servicio normal. Los ensayos no requieren más potencia que la de pérdidas consiguientes.

Se realizarán los siguientes ensayos:

■ *Medida de la resistencia de los arrollamientos*

Este ensayo permite medir la resistencia óhmica de los arrollamientos de un transformador, y este valor es aplicable al cálculo de las pérdidas óhmicas.

■ *Ensayo en vacío*

Este ensayo permite determinar la relación de transformación, la corriente de vacío y las pérdidas en el hierro del transformador.

■ *Ensayo en cortocircuito*

Este ensayo permite determinar las pérdidas en el cobre y la tensión de cortocircuito

FUNDAMENTO TEÓRICO

ENSAYOS DEL TRANSFORMADOR DE POTENCIA

1.- Introducción

Un transformador es una máquina estática destinada a transferir la energía eléctrica de un circuito a otro, utilizando, como enlace principal entre ambos, un flujo común de inducción. Convierte energía eléctrica alterna de un cierto nivel de tensión en energía eléctrica alterna de otro nivel de tensión.

Está constituido por dos o más bobinas aisladas entre si eléctricamente y arrolladas alrededor de un mismo núcleo de material ferromagnético.

La única conexión entre las bobinas la constituye el flujo magnético común que se establece en el núcleo, por lo tanto, hay que hacer notar que el transformador supone una discontinuidad, es decir, no se pueden unir directamente los dos circuitos.

Uno de los devanados se conecta a una fuente de potencia de corriente alterna y se denomina *primario*, mientras que el otro, que se conecta a la carga se denomina *secundario*. Si existiese un tercer arrollamiento, sería el devanado *terciario*.

Clasificación

- Según el destino:
 - ◇ De potencia.- Alimentados por tensión y frecuencia fijas.
 - ◇ De comunicación.- Previstos para trabajar con tensiones y frecuencias diversas.
 - ◇ De medida y protección.- Para facilitar la conexión de aparatos de medida o de protección.
 - ◇

- Según el sistema de tensiones:
 - ◊ Monofásicos
 - ◊ Trifásicos
 - ◊ Trifásicos-exafásicos
 - ◊ Trifásicos-dodecafásicos
 - ◊ Trifásicos-monofásicos
 - ◊ Etc.

- Según aumenten o disminuyan la tensión:
 - ◊ Elevadores
 - ◊ Reductores

- Según el medio ambiente para el que estén preparados:
 - ◊ De interior
 - ◊ De intemperie

- Según el elemento refrigerante:
 - ◊ En seco
 - ◊ En baño de aceite
 - ◊ En silicona
 - ◊ Con piraleno

- Según el sistema de refrigeración:
 - ◊ Con refrigeración natural
 - ◊ Con refrigeración forzada

Características nominales

Los valores nominales son aquellos para los que el transformador ha sido proyectado, es decir, para los que han de cumplirse las garantías ofrecidas.

Utilidad de los transformadores

La necesidad de emplear transformadores obedece en la práctica a las siguientes razones:

- Separar el circuito de alimentación del circuito de utilización de la energía.
 - ◊ Transformadores de aislamiento
 - ◊ Medición de tensiones e intensidades en una línea de Alta Tensión

- Para modificar los factores (tensiones o intensidades) de la energía eléctrica transmitida, adaptándolos a las condiciones óptimas que se precisen.
 - ◊ Tensiones elevadas y bajas intensidades para transporte de energía a grandes distancias
 - ◊ Tensiones e intensidades medias para distribución a los centros de consumo
 - ◊ Voltajes reducidos e intensidades inversamente considerables en las redes de consumo inmediato

Reducción de un transformador a la tensión de uno de sus arrollamientos

Reducción del secundario al primario

La reducción del secundario al primario consiste en:

- Multiplicar la tensión del secundario por la relación de transformación r_t .

$$U'_s = U_s r_t, \quad E'_s = E_s r_t$$

- Dividir la intensidad del secundario por la relación de transformación r_t . $I'_s = I_s \frac{1}{r_t}$

A las nuevas tensiones e intensidades se las designará con una tilde.

- La nueva relación de transformación será: $r'_t = \frac{U_p}{U'_s} = \frac{U_p}{U_s r_t} = \frac{U_p}{U_s} \frac{U_s}{U_p} = 1$

- Las impedancias (R_s, X_s, Z_c), reducidas al primario son:

$$Z'_c = \frac{U'_s}{I'_s} = \frac{U_s r_t}{I_s \frac{1}{r_t}} = Z_c r_t^2 \quad \text{lo mismo se aplicará para} \quad R'_s = R_s r_t^2, \quad X'_s = X_s r_t^2$$

Los valores de las impedancias del secundario se reducen al primario multiplicándolas por r_t^2

- Las potencias del secundario no sufren alteración al reducir las al primario:

$$R'_s I'^2_s = R_s r_t^2 \left(I_s \frac{1}{r_t} \right)^2 = R_s I_s^2$$

- Los ángulos no varían y, por tanto, tampoco los factores de potencia:

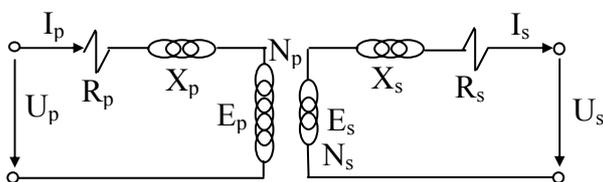
$$\text{tg } \phi'_s = \frac{X'_c}{R'_c} = \frac{r_t^2 X_c}{r_t^2 R_c} = \frac{X_c}{R_c} = \text{tg } \phi_s$$

Reducción del primario al secundario

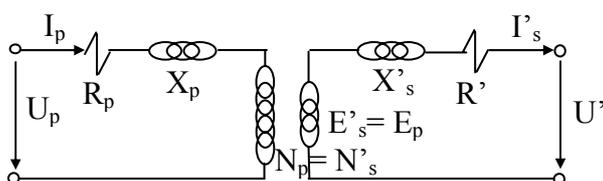
Se procederá igual que antes sustituyendo r_t por la relación inversa $\frac{1}{r_t}$

Esquema equivalente al transformador

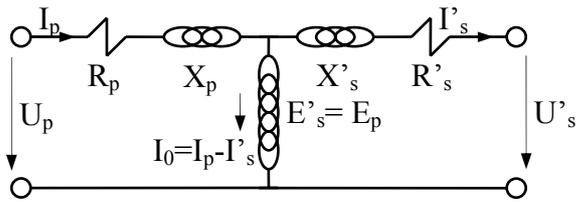
Supongamos el transformador de la Fig.



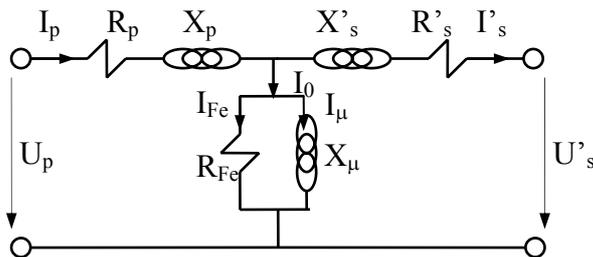
Si se reduce el secundario al primario, el esquema que se obtiene es el siguiente:



Como ahora tenemos el mismo potencial en el primario y en el secundario, se pueden unir para obtener un circuito equivalente:



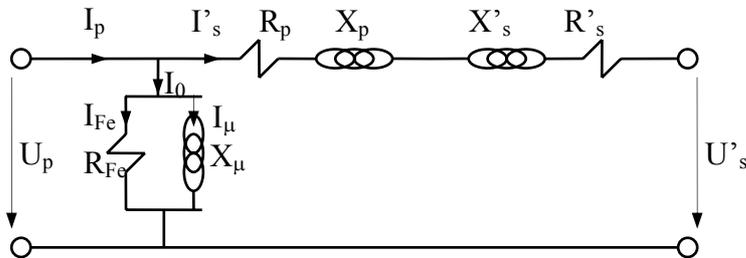
En este último esquema, existe una bobina, sobre un núcleo ferromagnético, que puede ser sustituida por el conjunto de una resistencia y una reactancia en paralelo que den el consumo I_0 . Si descomponemos I_0 en I_μ e I_{Fe} , tendremos el circuito equivalente exacto referido al primario:



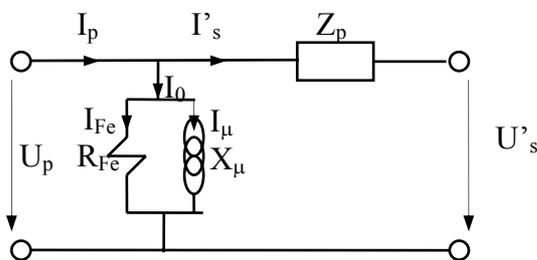
También se podría haber llegado a un circuito equivalente referido al secundario, reduciendo los valores del primario al secundario de forma análoga a lo anterior.

Esquema equivalente simplificado

Al ser la corriente de vacío muy pequeña, no se introduce un error importante si trasladamos la rama de vacío a la entrada del circuito.

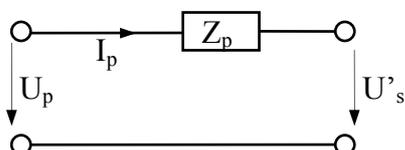


Que podemos agrupar de la siguiente forma:



Con: $R_{cc} = R_p + R'_s = R_p + r_t^2 R_s$
 $X_{cc} = X_p + X'_s = X_p + r_t^2 X_s$
 $Z_{cc} = R_{cc} + jX_{cc}$
 Impedancia equivalente referida al primario

Si suprimimos la rama en paralelo de vacío, el esquema equivalente queda:



2.- Ensayos del transformador

Con objeto de determinar los diferentes parámetros del transformador o características en carga se realizan una serie de pruebas o ensayos.

2.1.- Medida de resistencia de los arrollamientos

La caída óhmica U_R , en una resistencia R , por la cual circula la corriente I , viene dada por la expresión: $U_R = RI$

La resistencia R depende de la temperatura y es necesario precisarla. La corriente I para la cual interesa conocer principalmente dicha caída U_R en los transformadores suele ser la nominal o de plena carga.

Variación de la resistencia del cobre con la temperatura

En cualquier condición, la resistencia de un conductor con corriente continua, viene dada por:

$$R = \frac{\rho l}{S} \quad \rho = \text{resistividad del material en } \Omega \text{ mm}^2/\text{m}$$

$$l = \text{longitud del conductor en m}$$

$$S = \text{sección del conductor en mm}^2$$

Valores tomados a la temperatura de referencia.

La variación de la resistencia del cobre con la temperatura es lineal, desciende a medida que ésta disminuye, llegando incluso a anularse para el “cero eléctrico absoluto” T_0 . El cero físico se halla a unos 273°C bajo cero, mientras que el eléctrico, para el cobre patrón, se encuentra a unos $234,5^\circ \text{C}$ bajo cero.

Si evaluamos las temperaturas a partir del cero eléctrico absoluto designándolas por T , y por t las temperaturas Celsius, la dependencia lineal nos da inmediatamente, por ley de semejanza geométrica:

$$\frac{R_2}{R_1} = \frac{T_2}{T_1} = \frac{T_0 + t_2}{T_0 + t_1} = \frac{234,5 + t_2}{234,5 + t_1}$$

La resistencia óhmica R es proporcional a la temperatura eléctrica absoluta T del cobre.

Restando entre sí los términos de cada razón: $\frac{R_1}{T_1} = \frac{R_2}{T_2}$; $\frac{R_2 - R_1}{T_2 - T_1} = \frac{R_1}{T_1}$

haciendo: $\frac{1}{T_1} = \frac{1}{T_0 + t_1} = \alpha_1$, se deduce: $\frac{\left(\frac{R_2 - R_1}{T_2 - T_1}\right)}{R_1} = \alpha_1 = \frac{\left(\frac{R_2 - R_1}{t_2 - t_1}\right)}{R_1}$

El coeficiente α_1 , inverso de la temperatura eléctrica absoluta T , se denomina *coeficiente de temperatura* y representa la variación de resistencia que experimenta el conductor por $^\circ\text{C}$ de variación de la misma y por ohmio de resistencia inicial. De la última ecuación se desprende:

$$R_2 - R_1 = R_1 \alpha_1 (t_2 - t_1);$$

$$R_2 = R_1 [1 + \alpha_1 (t_2 - t_1)], \text{ variación de la resistencia en función de la temperatura.}$$

De aquí se deduce la manera de medir el calentamiento de un bobinado por medio de las resistencias R_1 y R_2 del mismo en frío y en caliente:

$$\Delta t = t_2 - t_1 = \left(\frac{R_2}{R_1} - 1 \right) \frac{1}{\alpha_1} = \left(\frac{R_2}{R_1} - 1 \right) T_1 = \left(\frac{R_2}{R_1} - 1 \right) (234,5 + t_1) [^\circ \text{C}]$$

En el ensayo de máquinas eléctricas y transformadores éste es el método normal de averiguar el calentamiento de los bobinados. Si el ensayo dura largo tiempo y entretanto la temperatura ambiente θ ha variado desde θ_1 a θ_2 , para tener el calentamiento debido exclusivamente a las pérdidas habrá que restar del resultado anterior, la elevación $(\theta_2 - \theta_1)$ que proviene del ambiente mismo y que hubiese aparecido aún sin pérdidas de ningún género.

En definitiva, el calentamiento promovido solamente por las pérdidas viene dado por:

$$\Delta t = \left(\frac{R_2}{R_1} - 1 \right) (234,5 + t_1) - (\theta_2 - \theta_1); \text{ fórmula de uso común en todos los laboratorios de}$$

ensayos eléctricos.

La resistividad del cobre electrolítico comercial, recocido, tras las manipulaciones de fabricación y montaje de las bobinas es de $1/56 \Omega \text{mm}^2/\text{m}$, y el coeficiente de temperatura α_1 a 20°C iniciales, es $\frac{1}{234,5 + 20} = 0,003929$.

Para cálculos aproximados puede tomarse: $\alpha_1 = \frac{1}{250} = 0,004$

Resistencia en corriente alterna

Con corriente de este género, el efecto superficial (efecto skin) o efecto pelicular, debido al flujo autoinducido que circula por la sección propia de cada conductor provoca una distribución irregular de la corriente tendiendo a concentrarse ésta en determinadas zonas de paso, lo cual equivale a un aumento de la resistencia óhmica.

Las resistencias óhmicas que hay que considerar a todos los efectos de funcionamiento del transformador son precisamente las resistencias en corriente alterna, incluidos, pues, estos incrementos por efecto superficial.

Las caídas óhmicas deben valorarse teniendo en cuenta todas estas circunstancias.

Si designamos por r la resistencia de uno cualquiera de los bobinados a la frecuencia de servicio e I la corriente nominal que lo recorre, la caída óhmica en él ascenderá a: $U_r = rI [V]$

Sea: $\rho \left[\frac{\Omega \text{mm}^2}{\text{m}} \right]$ la resistividad del material a la temperatura dada.

N el número de espiras del bobinado

l_m la longitud media de una espira en metros; $l = N l_m [m]$

S la sección del conductor en mm^2

δ densidad media de corriente; $\delta = l/S [A/\text{mm}^2]$

Tendremos en valor absoluto: $U_r = rI = \frac{\rho l}{S} I = \rho N l_m \delta [V]$

Si la tensión nominal que aparece en bornes es U , la caída óhmica en valor relativo será:

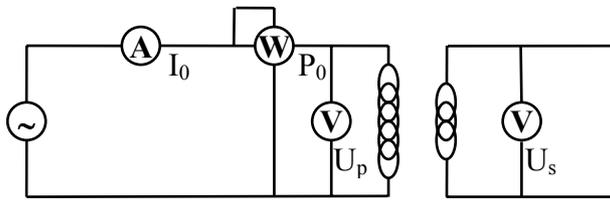
$$\varepsilon_r = \frac{U_r}{U} = \frac{\rho N l_m \delta}{U} = \frac{\rho}{U} I_m \delta = \frac{\rho}{U_N} I_m \delta ;$$

donde: $U_N = \frac{U}{N}$ representa la tensión nominal por espira del bobinado

La resistividad ρ_{75} a la temperatura de 75 °C, fijada por las normas para el cómputo del rendimiento, incluido un 10% de aumento por efecto superficial, puede tomarse para el cobre comercial en $0,0237 \Omega \text{ mm}^2/\text{m}$ y a 110 °C temperatura máxima admisible de servicio, $\rho_{110} = 0,0264 \Omega \text{ mm}^2/\text{m}$.

2.2.- Ensayo en vacío

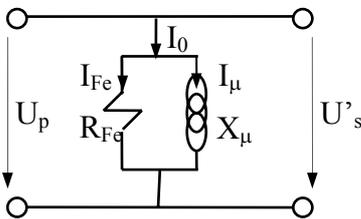
Consiste en aplicar la tensión nominal en uno de los lados, manteniendo el circuito abierto en el otro devanado y midiendo la tensión, la intensidad y la potencia según el esquema:



Este ensayo nos proporcionará:

$$U_p, \quad U_s, \quad I_0, \quad P_0$$

Si consideramos el circuito aproximado del transformador:



El vatímetro mide prácticamente las pérdidas en el hierro $P_0 = P_{Fe}$, que se consideran constantes, cualquiera que sea la carga.

$$P_0 = U_p I_{Fe} \quad \rightarrow \quad I_{Fe} = \frac{P_0}{U_p}$$

$$P_0 = R_{Fe} I_{Fe}^2 \quad \rightarrow \quad R_{Fe} = \frac{P_0}{I_{Fe}^2}$$

$$I_{\mu} = \sqrt{I_0^2 - I_{Fe}^2} \quad P_0 = U_p I_0 \cos \varphi_0 \quad \rightarrow \quad \cos \varphi_0 = \frac{P_0}{U_p I_0}$$

$$U_p = X_{\mu} I_{\mu} \quad \rightarrow \quad X_{\mu} = \frac{U_p}{I_{\mu}}$$

Los resultados de interés, que proporciona el ensayo de vacío, son:

- *Corriente de vacío* I_o
Prácticamente coincide con I_o necesaria para mantener el flujo en carga. Está constituida por la de suministro de pérdidas en el hierro I_{Fe} y por la corriente magnetizante I_{μ} .

- *Pérdidas en el hierro* P_{fe}

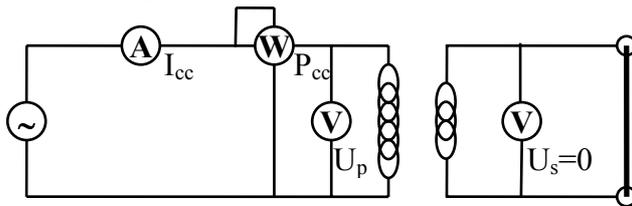
- *Relación de transformación* r_t

$$r_t = \frac{N_p}{N_s} = \frac{U_p}{U_s} \quad \text{Porque:} \quad E_p \cong U_p, \quad E_s \cong U_s$$

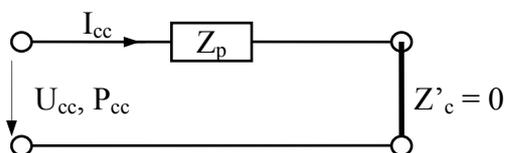
2.3.- Ensayo en cortocircuito

Se cortocircuita un devanado y se aplica en el otro una tensión reducida, hasta que pase, por este lado del transformador, la corriente nominal.

Esta tensión aplicada, se denomina *tensión de cortocircuito* U_{cc} y es un valor característico de los transformadores, proporcionado por el fabricante y expresado en % respecto de la tensión nominal U_n .



Para el estudio utilizamos el circuito equivalente aproximado referido al primario:



$$I_{cc} = I_n \quad \text{a la intensidad nominal}$$

$$P_{cc} = P_{cu} \quad \text{las pérdidas serán las de los devanados}$$

$$P_{cc} = R_p I_n^2 \quad \rightarrow \quad R_p = \frac{P_{cc}}{I_n^2}$$

$$U_{cc} = Z_p I_n \quad \rightarrow \quad Z_p = \frac{U_{cc}}{I_n} \quad X_p = \sqrt{Z_p^2 - R_p^2}$$

$$P_{Cu} (\text{p. u.}) = \frac{P_{Cu}}{S} = \frac{R_p I_n^2}{UI_n} = \frac{U_{Rp}}{U} = U_{Rp} (\text{p. u.})$$

Las pérdidas en el cobre en valores por unidad coinciden con la caída de tensión resistiva en valores por unidad.

Hay que tener en cuenta en que devanado nos dan los datos, si en el primario o en el secundario.

DESCRIPCIÓN DE LA PRÁCTICA

Medida de resistencia de los arrollamientos de un transformador

El ensayo pretende realizar la medición de la resistencia entre los terminales en los lados de Alta y Baja Tensión de un transformador.

La medición se realizará estando el transformador a la temperatura ambiente. La temperatura del transformador se medirá mediante un termómetro, colocado lo mas cerca posible del mismo, de tal forma que la medida en el aire que rodea al transformador sea fiel reflejo de la de sus arrollamientos.

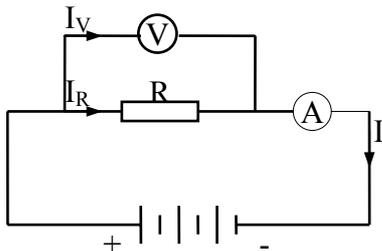
El ensayo se efectúa con corriente continua. La medida de la resistencia se hará mediante el sistema de medición indirecta con voltímetro y amperímetro, en cuyo caso la resistencia se obtendrá por el cociente de las respectivas medidas. La intensidad aportada no excederá del 15% de la intensidad nominal del arrollamiento cuya resistencia se mide.

El método de medición da lugar a dos tipos de conexión:

- Montaje corto
- Montaje largo

Montaje corto

El voltímetro se conecta a los extremos de la resistencia cuyo valor tratamos de determinar.



La tensión medida por el voltímetro, es igual a la tensión aplicada a la resistencia. En cambio, la intensidad leída por el amperímetro, incluye la intensidad que pasa por el voltímetro, con lo cual: $I = I_R + I_V$

El verdadero valor de la resistencia es: $R = \frac{V}{I_R}$

siendo el valor que obtenemos con las lecturas efectuadas con este montaje:

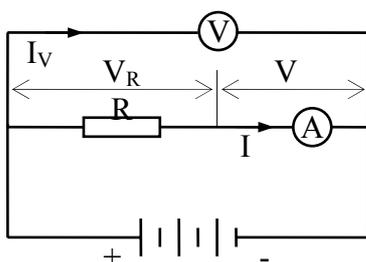
$$R' = \frac{V}{I} = \frac{V}{I_R + I_V}$$

Para que el valor real de R y el leído R', sean iguales, I_V ha de ser nula, lo que se consigue en el caso teórico de que la resistencia del voltímetro sea infinita. En la práctica esto es imposible, por lo cual debe procurarse que la resistencia del voltímetro sea lo más elevada posible comparada con al resistencia que se trata de medir.

El *montaje corto* es por lo tanto aconsejable, cuando se trata de medir resistencias pequeñas.

Montaje largo

El amperímetro se conecta a continuación de la resistencia cuyo valor tratamos de determinar.



La intensidad medida por el amperímetro, es igual a la intensidad que pasa por la resistencia. El voltímetro en cambio, medirá la caída de tensión en la resistencia más la caída de tensión en el amperímetro: $V = V_R + V_A$

El verdadero valor de la resistencia es: $R = \frac{V_R}{I}$

pero el valor que obtenemos con las lecturas efectuadas con este montaje: $R' = \frac{V}{I} = \frac{V_R + V_A}{I}$

Para que el valor real de R y el leído R' , sean iguales, la caída de tensión en el amperímetro, V_A ha de ser cero, o lo que es equivalente, que la resistencia del amperímetro sea cero. Como estas condiciones, en la práctica, no se pueden cumplir, procuraremos que la resistencia del amperímetro sea despreciable, comparada con la resistencia que se trata de medir.

El *montaje largo* es por lo tanto adecuado, cuando se trata de medir resistencias elevadas.

Como este valor de la resistencia se ha conseguido con corriente continua, y en realidad por los arrollamientos va a circular corriente alterna es necesario multiplicar por un coeficiente, llamado de SKIN. Se admite normalmente un 10% de aumento sobre la resistencia en corriente continua.

Ensayo en vacío de un transformador

Un transformador trabaja en vacío cuando el circuito secundario está abierto. En estas condiciones, el primario es recorrido por una corriente alterna de pequeña intensidad, del orden del 5% de la corriente nominal. Esta corriente tiene dos componentes, una suministra las pérdidas en el hierro y la otra proporciona la f.m.m. necesaria para magnetizar el núcleo.

La potencia absorbida por el transformador trabajando en vacío corresponde casi exactamente a las pérdidas en el hierro. Como la corriente que circula por el secundario es nula, no aparecen en él pérdidas en el hierro.

Por otra parte, como la corriente en vacío es muy pequeña comparada con la corriente de carga, resultan prácticamente despreciables las pérdidas en el cobre del primario.

Por lo tanto, se puede afirmar que el total de la potencia absorbida funcionando el transformador en vacío, bajo la tensión nominal, representa el valor de la potencia perdida en el hierro del circuito magnético.

Esta potencia perdida es constante, independiente de la carga del transformador, pues depende del núcleo, de la inducción y de la frecuencia. Como estos valores son constantes, siempre que lo sean la tensión y la frecuencia de la red de alimentación, la potencia perdida en el hierro del transformador permanecerá constante con independencia del régimen de funcionamiento.

El ensayo se realizará aplicando la tensión nominal de entrada a los bornes del arrollamiento primario, o la tensión de vacío al secundario, manteniendo abierto el otro devanado. El ensayo en vacío nos proporciona:

■ **Corriente de vacío I_0**

Constituida por la de suministro de pérdidas en el hierro I_{Fe} , y por la corriente magnetizante I_{μ} .

■ **Pérdidas en vacío P_0**

Que representan las pérdidas en el hierro P_{Fe} ya que las pérdidas por efecto Joule, debido a la corriente en vacío son despreciables.

De aquí se pueden deducir la corriente de pérdidas en el hierro I_{Fe} y la magnetizante I_{μ} :

$$I_{Fe} = \frac{P_0}{U_p} \quad I_{\mu} = \sqrt{I_0^2 - I_{Fe}^2}$$

■ Relación de transformación

Midiendo al mismo tiempo la tensión secundaria U_s se obtiene:

$$\frac{N_p}{N_s} = \frac{U_p}{U_s}$$

El ensayo en vacío se puede realizar a tensión reducida. Se puede efectuar aplicando la tensión de alimentación por el lado de baja tensión y si éste es el primario, las lecturas de la corriente de vacío es directa. Si por lado que se aplica la tensión de alimentación es el secundario, la indicación del amperímetro I_0 , así como la intensidad de pérdidas en el hierro I_{Fe} y la magnetizante I_{μ} , deben reducirse al primario multiplicándolas por la relación, U_s/U_p .

Ensayo en cortocircuito de un transformador

El ensayo se realiza cortocircuitando uno de los lados (primario o secundario) y aplicando por el otro un voltaje reducido hasta que pase por este lado del transformador la corriente nominal.

De este ensayo pueden deducirse fácilmente las constantes más importantes de los devanados:

- Caída de tensión de resistencia
- Caída de tensión de reactancia de dispersión
- Caída de tensión de impedancia o de cortocircuito
- Pérdidas en las bobinas.

El ensayo se efectuará aplicando baja tensión al primario, a fin de que por él circule justamente la corriente de plena carga. Nótese que en este caso las resistencias comprenden el aumento debido al flujo de dispersión producido por la corriente de plena carga, a la vez que, por ser muy reducido el flujo que se precisa para inducir en los devanados la escasa f.e.m. que debe desarrollarse, la corriente de excitación puede considerarse despreciable.

Del ensayo, con la corriente de cortocircuito igual a la nominal de plena carga, surgen inmediatamente las pérdidas en los bobinados P_{Cu} incluidas las adicionales, por hallarse presente todo el flujo de dispersión, que en valores por unidad son:

$$P_{Cu} (\text{p. u.}) = \frac{P_{Cu}}{S} \quad \text{siendo: } S \text{ potencia aparente del transformador}$$

Si U es la tensión del devanado que actúa como primario con el voltaje aplicado U_{cc} , en valores por unidad será:

$$U_{cc} (\text{p. u.}) = \frac{U_{cc}}{U}$$

La potencia perdida en cortocircuito, siendo el flujo tan débil, se consume prácticamente toda en la resistencia de los devanados, dando así paso a la caída de tensión por resistencia, que valores por unidad es:

$$U_{R_{cc}} (\text{p. u.}) = \frac{U_{R_{cc}}}{U} = \frac{R_{cc} I_n}{U} = \frac{R_{cc} I_n^2}{U I_n} = \frac{P_{Cu}}{S} = P_{Cu} (\text{p. u.})$$

Es indistinto cual de los dos devanados se haya puesto en cortocircuito, generalmente será el de baja tensión para que la tensión del lado de alta sea más cómodo medir.

El factor de potencia en el ensayo de cortocircuito valdrá:

$$\cos \varphi_{cc} = \frac{P_{cc}}{U_{cc} I_n}$$

Y las caídas de tensión de resistencia y de reactancia de dispersión serán:

$$U_{R_{cc}} = U_{cc} \cos \varphi_{cc}$$

$$U_{X_{cc}} = U_{cc} \sin \varphi_{cc}$$

Normalmente los valores de cortocircuito se expresan en %:

$$\varepsilon_{cc} \% = \frac{U_{cc}}{U_n} 100 = \frac{Z_{cc} I_n}{U_n} 100$$

$$\varepsilon_{R_{cc}} \% = \frac{U_{R_{cc}}}{U_n} 100 = \frac{R_{cc} I_n}{U_n} 100$$

$$\varepsilon_{X_{cc}} \% = \frac{U_{X_{cc}}}{U_n} 100 = \frac{X_{cc} I_n}{U_n} 100$$

En definitiva la corriente de cortocircuito de un transformador vendrá limitada por las resistencias de sus devanados y por las reactancias de dispersión del primario y secundario. El valor de la impedancia interna de un transformador se mantiene prácticamente constante para cualquier régimen de carga.

El ensayo de cortocircuito sirve para determinar globalmente las pérdidas en el cobre y las adicionales. Estas últimas son debidas a distorsiones del flujo magnético, distribución no uniforme de la corriente en los conductores (especialmente en los de gran sección), corrientes parásitas en la masa metálica cercana a los devanados y a otras causas de menor importancia. En la práctica, debido al escaso valor que toman las pérdidas en el hierro, puesto que la tensión aplicada U_{cc} es del orden del 5%, se deprecian. Lo mismo sucede con las pérdidas adicionales.

EQUIPO NECESARIO

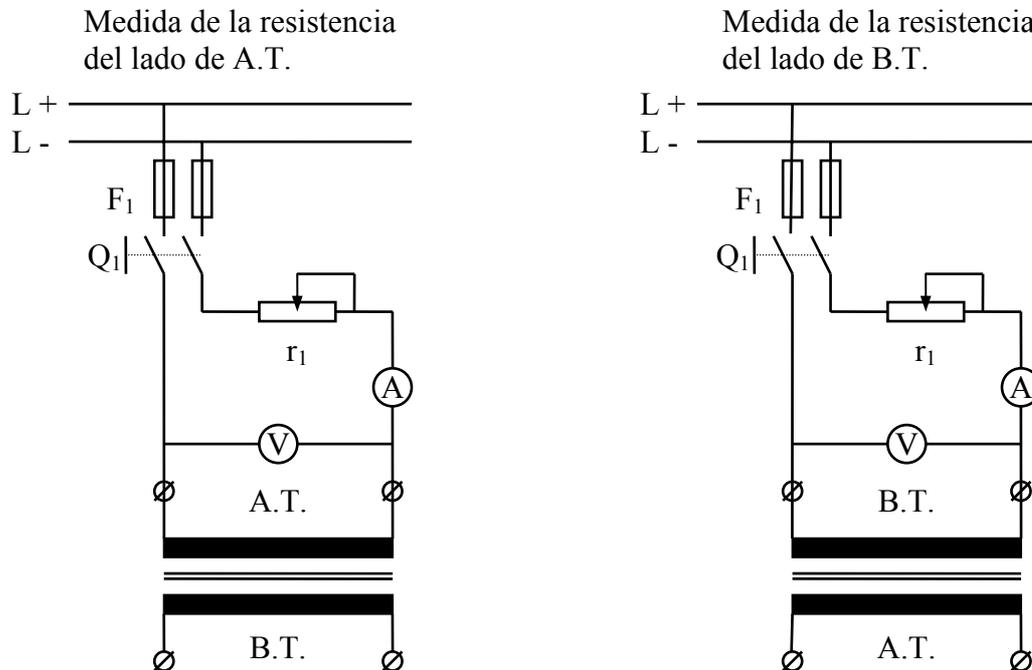
- 2 Voltímetros
- 2 Amperímetros
- 1 Reostato
- 1 Vatímetro
- 1 Frecuencímetro
- Fuente de alimentación de corriente continua
- Fuente de alimentación de corriente alterna regulable

Transformador:		500 VA (25° C)	400 VA (40° C)	
Potencia:			Bornes	
Tensiones:			Puentes	Alimentación
- Primario:	230 V		1 - 2	2 - 3
	400 V		3 - 4	1 - 4
	460 V		2 - 3	1 - 5
- Secundario:	115 V		5 - 6	6 - 7
	230 V		7 - 8	4,34 A
			6 - 7	2,17 A

REALIZACIÓN DE LA PRÁCTICA

Medida de resistencia de los arrollamientos de un transformador

Esquema de montaje



Desarrollo de la práctica

El ensayo se efectúa sobre un transformador monofásico.

El método de medición adoptado es el de montaje corto.

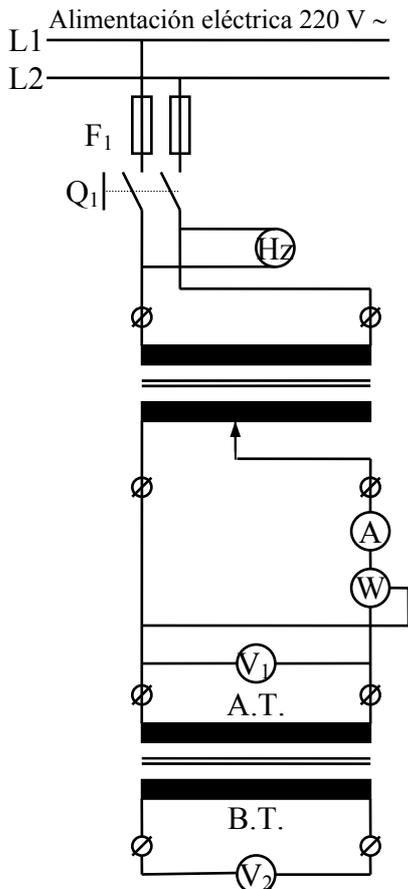
Para el ensayo utilizaremos corriente continua. La medida de la resistencia se obtendrá dividiendo el valor registrado por voltímetro entre el registrado por el amperímetro. Al final se realizará la media de los valores de los ensayos realizados y se calculará el valor de la resistencia en corriente alterna.

Se registrará la temperatura ambiente, mediante un termómetro situado lo más cerca posible de los arrollamientos del transformador, de tal forma que la medida en el aire que rodea al transformador sea fiel reflejo de la de sus arrollamientos.

Por último, se calculará el valor de la resistencia para una temperatura de los arrollamientos de 75 °C.

Ensayo en vacío de un transformador

Esquema de montaje



Desarrollo de la práctica

La tensión se aplica a los bornes de uno de los arrollamientos estando el otro abierto.

El ensayo puede ser realizado con una sola tensión, la nominal, sin embargo, es conveniente efectuar cuatro o cinco ensayos a tensión creciente con el fin de trazar la curva característica y tener una comprobación de los valores (si un punto queda fuera de la curva indica que ha habido un error de cálculo o de lectura).

Se parte de la tensión mínima hasta llegar a una tensión aproximada del 10% de la nominal, con el fin de obtener por interpolación, y no por extrapolación, el valor exacto de las pérdidas a dicha tensión nominal.

Es necesario medir la frecuencia, ya que las pérdidas en el hierro dependen de la frecuencia. El frecuencímetro se conectará antes del variador de tensión con el fin de alimentarlo a tensión constante.

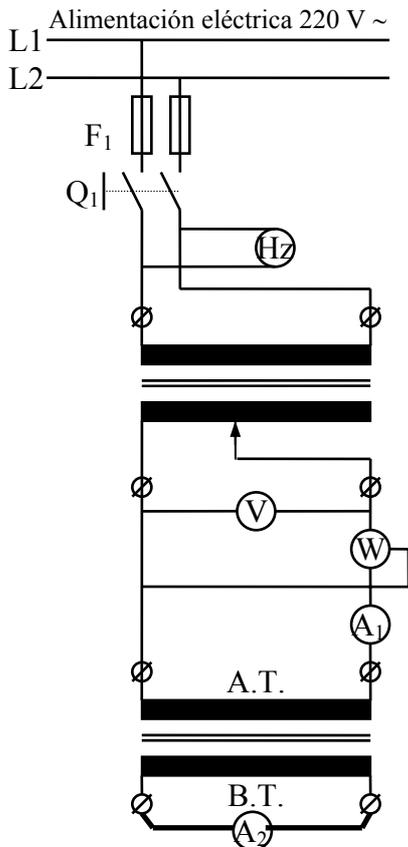
En este ensayo el factor de potencia tiene un valor bajo.

La medida obtenida con el vatímetro corresponde, íntegramente, a las pérdidas en el hierro.

La medida del amperímetro corresponde a la corriente de vacío.

Ensayo en cortocircuito de un transformador

Esquema de montaje



Desarrollo de la práctica

Se cortocircuita con conductores de gran sección, el devanado de baja tensión del transformador a ensayar y se alimenta el devanado de alta tensión, mediante tensión variable.

Se inicia el ensayo partiendo de una tensión nula y se va aumentando gradualmente hasta que el amperímetro A_1 señale la intensidad de plena carga. En ese momento el amperímetro A_2 indicará la intensidad nominal.

La relación entre las intensidades I_1 e I_2 es la misma que la relación de transformación en vacío. El ensayo también podría haberse realizado alimentando el otro devanado.

En este ensayo la medición más importante es la intensidad. El voltímetro, es conveniente conectarlo directamente a los bornes de la bobina voltímetrica del vatímetro, con el fin de poder calcular fácilmente el autoconsumo de los instrumentos de medida.

La lectura del voltímetro determina la llamada tensión de cortocircuito, o sea, la tensión necesaria en el primario para obtener en el secundario, puesto en cortocircuito, la intensidad nominal. En la placa de características de los transformadores debe figurar la tensión de cortocircuito y el correspondiente $\cos \phi$, para cuando funcionan en paralelo.

Con el amperímetro, voltímetro y vatímetro medimos el valor de la intensidad, tensión y potencia de cortocircuito. Si el ensayo se realiza a intensidad nominal las pérdidas en el cobre son las nominales y corresponden a la lectura del vatímetro.

RESULTADOS

Medida de resistencia de los arrollamientos de un transformador

Medida de resistencia de los arrollamientos de un transformador						
Ensayo Nº	Lado de A.T.			Lado de B.T.		
	Amperímetro A	Voltímetro V	Resistencia Ω	Amperímetro A	Voltímetro V	Resistencia Ω

Temperatura °C	Lado de A.T.		Lado de B.T.	
	Resistencia media en c.c. Ω	Resistencia media en c.a. Ω	Resistencia media en c.c. Ω	Resistencia media en c.a. Ω
75 °C				

Ensayo en vacío de un transformador

Ensayo en vacío de un transformador					
Ensayo	Voltímetro V_1	Amperímetro A	Vatímetro W	Frecuencímetro Hz	Voltímetro V_2
80% U_n					
90% U_n					
100% U_n					
105% U_n					
110% U_n					

Corriente de vacío			Pérdidas en el hierro P_{Fe}	Relación de transformación r_t
Vacío I_0	Pérd. hierro I_{Fe}	Magnetiz. I_{μ}		

Resistencia de pérdidas en el hierro R_{Fe}	Reactancia magnetizante X_{μ}	Factor de potencia en vacío $\cos \phi_0$

Ensayo en cortocircuito de un transformador

Ensayo en cortocircuito de un transformador					
Ensayo	Voltímetro	Amperímetro	Vatímetro	Frecuencímetro	Amperímetro
	V	A₁	W	Hz	A₂
80% I _n					
90% I _n					
100% I _n					
105% I _n					
110% I _n					

Pérdidas en el cobre a plena carga (W)	
Intensidad nominal (A)	
Factor de potencia (cos φ_{cc})	

Tensión de cortocircuito	Caída de tensión por resistencia	Caída de tensión por reactancia	Tensión de cortocircuito	Tensión de cortocircuito por resistencia	Tensión de cortocircuito por reactancia
U_{cc}	U_{Rcc}	U_{Xcc}	ε_{cc}	ε_{Rcc}	ε_{Xcc}
V	V	V	%	%	%

Conclusiones:

Medida de resistencia de los arrollamientos de un transformador

Ensayo en vacío

Ensayo en cortocircuito

ANEXO