

TRANSFORMADOR REAL

Norberto A. Lemozy

1 INTRODUCCIÓN

En los transformadores reales no cumplen las premisas que definían a los ideales, pero se les aproximan mucho, especialmente en las unidades de gran potencia, en efecto, se tiene que:

Tabla I. Características de los transformadores reales.

	Pero ...
$R > 0$	Son pequeñas.
$P_{Fe} > 0$	Son pequeñas.
$\mu_{Fe} < \infty$	Es muy alta.
$C > 0$	Son muy pequeñas.

Si bien estas diferencias son pequeñas, y como ya se dijo, en la mayoría de los casos, deben ser tenidas en cuenta.

Una conclusión inmediata de lo establecido en la tabla I, es que el rendimiento, aunque muy elevado, resulta menor que la unidad y además se producirán caídas de tensión, en general muy pequeñas.

A continuación se hace un análisis de las principales consecuencias de las diferencias establecidas en la tabla I.

2 EL FLUJO Y LA REACTANCIA DE DISPERSIÓN

Cuando se estudió el reactor, al flujo se lo consideró único, por que no era necesario hacer ninguna separación; pero en el estudio de las máquinas eléctricas, en general conviene separar el flujo que se cierra principalmente a través del hierro, y concatena a los distintos arrollamientos de la máquina, del que se cierra principalmente por el aire y concatena a un solo arrollamiento. A este último se lo denomina *flujo de dispersión*.

El flujo que se cierra principalmente a través del hierro, se denomina flujo *mutuo* o *principal*, es mucho mayor que el de dispersión y es el responsable de la transferencia y de la conversión de la energía.

En realidad el flujo dentro de las máquinas *es único* y la división en mutuo y disperso, es un tanto arbitraria y, aunque naturalmente imprecisa, resulta muy útil y de uso generalizado. La razón de esta división es que *el flujo disperso*, al cerrarse principalmente por el aire, *es proporcional a la corriente que lo está produciendo y está en fase con la misma*, como se vio al estudiar el reactor en aire, por lo que sus efectos prácticamente no están afectados por alinealidad del núcleo ferromagnético.

En la figura 1 se muestra un esquema de un transformador, con núcleo de columnas y de dos arrollamientos donde se han indicado esquemáticamente los flujos mutuo y los de dispersión.

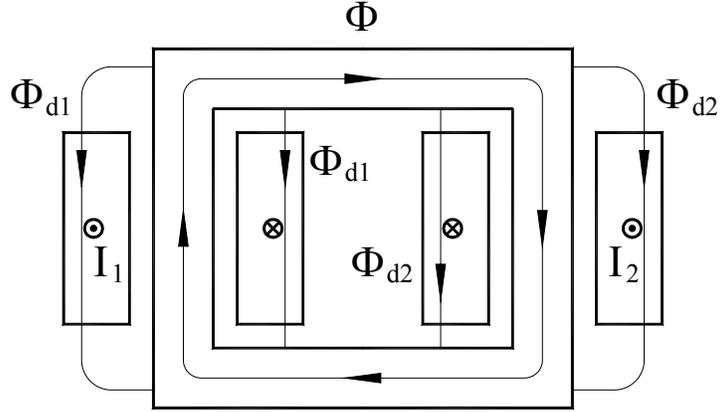


Fig. 1. Flujos mutuo y de dispersión.

Al dividir el flujo en dos partes, cada uno de ellos producirá una fuerza electromotriz inducida, y, por ejemplo, la tensión primaria del transformador de la figura 1, se puede expresar como:

$$\dot{U}_1 = \dot{E}_1 + \dot{E}_{d1} + r_1 \dot{I}_1 \quad (1)$$

Donde el subíndice 1 denota al primario y E y E_d son las fuerzas electromotrices inducidas por los flujos mutuo y de dispersión primario, respectivamente. Como la fuerza electromotriz E_{d1} es proporcional al flujo disperso, y éste es proporcional a la corriente I_1 , se la puede expresar como:

$$\dot{E}_{d1} = j x_1 \dot{I}_1 \quad (2)$$

En la que el operador j se agrega para tener en cuenta que la fuerza electromotriz inducida adelanta 90 grados al flujo y a la corriente que la están produciendo. Como esta situación es semejante a lo que ocurre en una reactancia inductiva, al coeficiente de proporcionalidad se lo indica con una x , se lo denomina *reactancia de dispersión* y es prácticamente constante.

Reemplazando la ecuación (2) en la (1), resulta:

$$\dot{U}_1 = \dot{E}_1 + j x_1 \dot{I}_1 + r_1 \dot{I}_1 = \dot{E}_1 + (r_1 + j x_1) \dot{I}_1 \quad (3)$$

Si bien es posible aplicar el mismo criterio a la fuerza electromotriz inducida E_2 , la reactancia resultante, de tipo magnetizante, debido a la saturación del núcleo ferromagnético, no es constante, y su aplicación no es tan frecuente, no obstante hay modelos de máquinas que así lo hacen y son usados para el estudio de transitorios.

Por lo dicho las ecuaciones de tensión de un transformador monofásico de dos arrollamientos resultan:

$$\boxed{\dot{U}_1 = \dot{E}_1 + (r_1 + j x_1) \dot{I}_1} \quad (4)$$

$$\boxed{\dot{U}_2 = \dot{E}_2 - (r_2 + j x_2) \dot{I}_2} \quad (5)$$

Donde el subíndice 2 de la ecuación (5) denota al secundario y el cambio de signo es consecuencia de las convenciones de signo adoptadas, a saber: el primario en convención *consumidora* y el secundario en convención *generadora*.

Las caídas de tensión en la resistencia y en la reactancia de dispersión de los arrollamientos, son un pequeño porcentaje de la respectiva fuerza electromotriz inducida.

Representando fasorialmente las ecuaciones (4) y (5) resulta la figura 2 donde las caídas de tensión en las resistencias y en las reactancias de dispersión se han ampliado para mayor claridad.

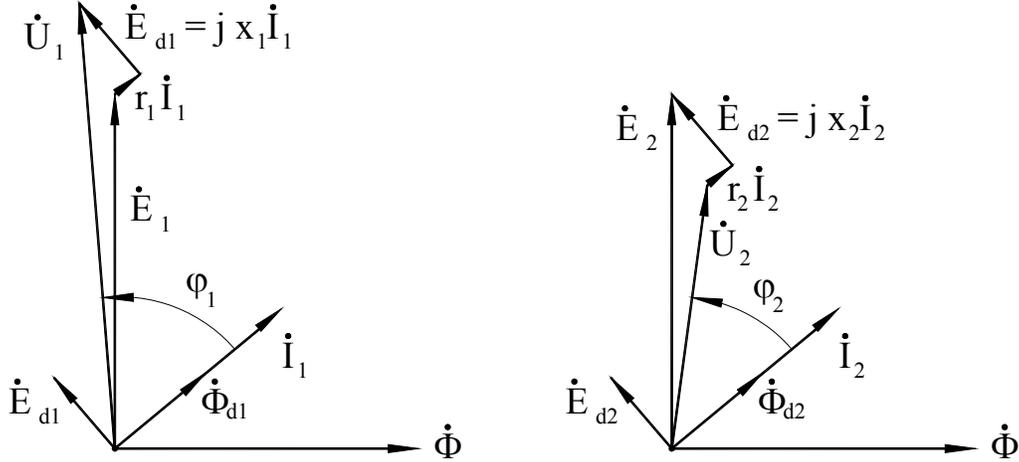


Fig. 2. Diagramas fasoriales del primario y del secundario.

Los ángulos de las corrientes I_1 e I_2 dependen de la carga del transformador, en el ejemplo de la figura 2, se supuso una carga del tipo inductivo resistivo, de forma que resulten atrasadas de las respectivas tensiones U_1 y U_2 en los ángulos φ_1 y φ_2 respectivamente; ángulos que, debido a los pequeños valores que tienen las impedancias de los arrollamientos, son muy próximos entre sí.

3 LA RELACIÓN DE TRANSFORMACIÓN

El valor eficaz de cada una de las fuerzas electromotrices inducidas es:

$$E_1 = 4,44 f N_1 \Phi \quad (6)$$

$$E_2 = 4,44 f N_2 \Phi \quad (7)$$

Haciendo el cociente de las ecuaciones (6) y (7) se obtiene la relación de transformación

$$a = \frac{N_1}{N_2} = \frac{E_1}{E_2} \quad (8)$$

Como en el transformador real las tensiones difieren ligeramente de las fuerzas electromotrices inducidas, la relación de las tensiones, o como se verá en el punto 4, la relación de las corrientes, no igualan exactamente a la relación de transformación.

4 LAS FUERZAS MAGNETOMOTRICES

Como se vio en el transformador ideal la suma de las fuerzas magnetomotrices primaria y secundaria dan la fuerza magnetomotriz resultante que es la que produce el flujo mutuo Φ .

$$\dot{F}_R = \dot{F}_1 + \dot{F}_2 = \mathcal{R} \dot{\Phi} = \frac{l_{Fe}}{\mu_0 \mu_{Fe} S_{Fe}} \dot{\Phi} > 0 \quad (9)$$

Reemplazando las fuerzas magnetomotrices del primario y del secundario y teniendo en cuenta las convenciones de signo, resulta:

$$N_1 \dot{I}_1 - N_2 \dot{I}_2 = \dot{F}_R \quad (10)$$

Si el transformador, como es lo normal, está alimentado a tensión y frecuencia constantes, el flujo y la fuerza magnetomotriz resultante deben ser constantes, en todas las condiciones de funcionamiento. En el caso particular del funcionamiento en vacío, es decir sin carga, se tiene:

$$\begin{aligned} \dot{I}_1 &= \dot{I}_0 \\ \dot{I}_2 &= 0 \end{aligned} \quad (11)$$

Donde I_0 es la denominada *corriente de vacío*, mucho menor que la nominal. Entonces, cuando el transformador está sin carga, la ecuación (10) queda:

$$N_1 \dot{I}_0 = \dot{F}_R \quad (12)$$

Reemplazando este valor de fuerza magnetomotriz resultante en la ecuación (10):

$$\boxed{N_1 \dot{I}_1 - N_2 \dot{I}_2 = N_1 \dot{I}_0} \quad (13)$$

Que es la ecuación de fuerzas magnetomotrices de un transformador real.

La presencia de la corriente de vacío es la que hace que la relación de las corrientes secundaria y primaria difiera ligeramente de la relación de transformación.

5 CIRCUITOS EQUIVALENTES DEL TRANSFORMADOR

El modelo circuital o circuito equivalente del transformador real se deben cumplir las ecuaciones (4), (5), (8) y (13), a esta última, y para mayor claridad, se la puede reescribir de la siguiente forma:

$$\dot{I}_1 = \frac{\dot{I}_2}{N_1/N_2} + \dot{I}_0 = \frac{\dot{I}_2}{a} + \dot{I}_0 = \dot{I}'_2 + \dot{I}_0 \quad (14)$$

Donde I'_2 es la corriente secundaria referida al primario. Además, y como ya se vio en el reactor, la corriente de vacío conviene descomponerla en sus componentes magnetizante I_m y de pérdidas I_p , la primera atrasada 90° de la E_1 y la segunda en fase.

$$\dot{I}_0 = \dot{I}_m + \dot{I}_p \quad (15)$$

El circuito que cumple con esas ecuaciones es el siguiente, figura 3:

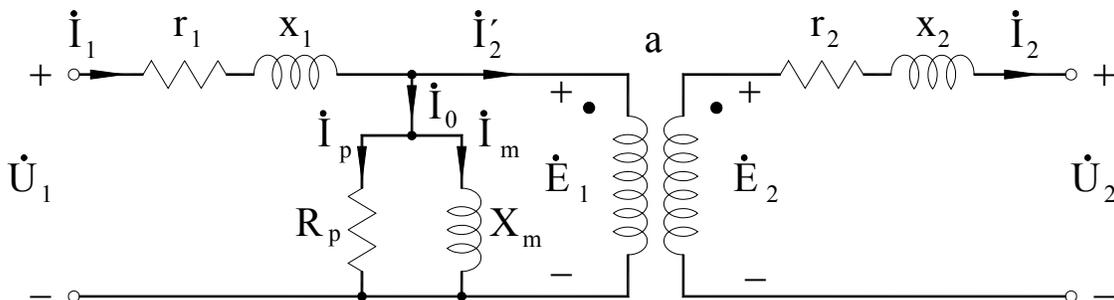


Fig. 3. Circuito equivalente exacto no referido.

Las impedancias que están a ambos lados del transformador ideal se pueden referir y agrupar todas de un mismo lado, por ejemplo, si la impedancia del secundario se refiere al primario, el circuito equivalente queda como se muestra en la figura 4.

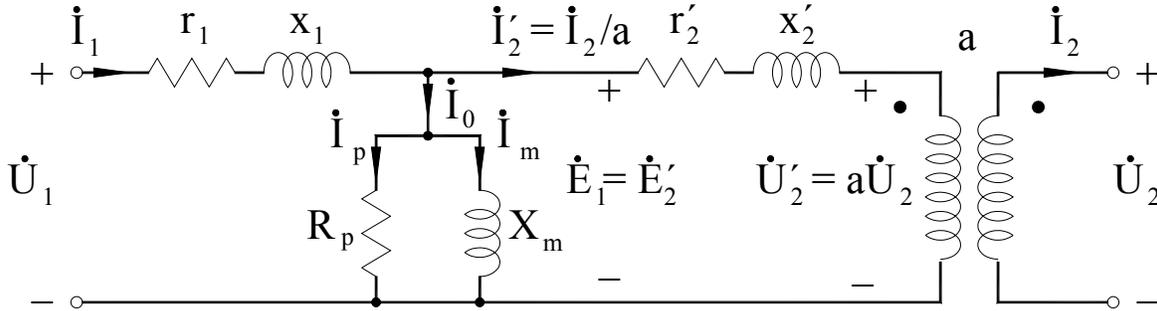


Fig. 4. Circuito equivalente exacto referido al primario.

$$\begin{aligned}
 r_2' &= a^2 r_2 \\
 x_2' &= a^2 x_2 \\
 \dot{E}_1 &= \dot{E}_2 = a \dot{E}_2 \\
 \dot{U}_2' &= a \dot{U}_2 \\
 i_2' &= \frac{i_2}{a}
 \end{aligned}
 \tag{16}$$

Si el transformador está alimentado por una fuente de tensión U_1 y tiene una carga Z_c en el secundario, el circuito resulta como el de la figura 5, donde para simplificar las impedancias se indicaron como rectángulos.

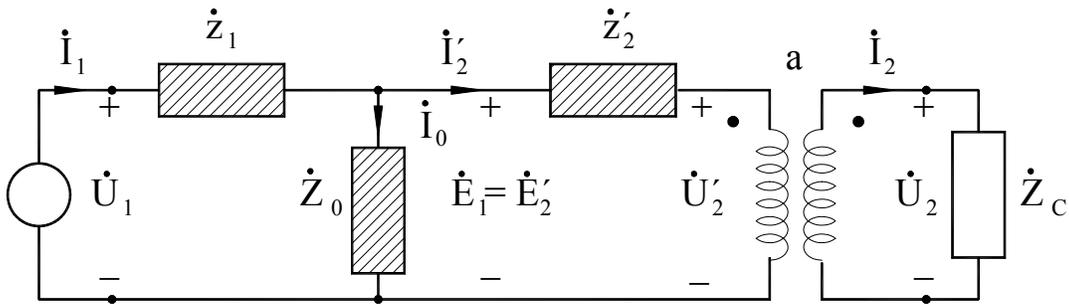


Fig. 5. Transformador con carga.

$$\begin{aligned}
 z_1 &= r_1 + jx_1 \\
 z_2 &= r_2 + jx_2 \\
 \dot{Z}_0 &= \frac{1}{\dot{Y}_0} = \frac{1}{\frac{1}{R_p} - j\frac{1}{X_m}}
 \end{aligned}
 \tag{17}$$

En la figura 5 la impedancia de carga que se encuentra a la derecha del transformador ideal, también se puede referir al primario del mismo y resulta el circuito de la figura 6.

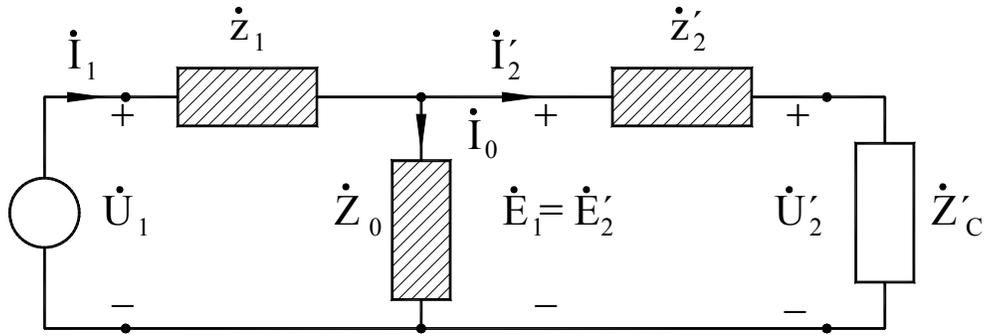


Fig. 6. Transformador con carga referida al primario.

$$\dot{Z}'_c = a^2 \dot{Z}_c \quad (18)$$

Al resolver el circuito de la figura 6 se obtienen valores referidos de tensión y de corriente secundarias, para obtener los verdaderos valores, presentes en la carga, se debe realizar el proceso inverso:

$$\begin{aligned} \dot{U}_2 &= \frac{\dot{U}'_2}{a} \\ \dot{I}_2 &= a\dot{I}'_2 \end{aligned} \quad (19)$$

5.1 Circuitos aproximados

Los circuitos mostrados en las figuras 3, 4, 5 y 6, donde las impedancias del transformador están formando una “T”, se denominan “*exactos*” y son circuitos de dos mallas cuya solución, si bien no es compleja, no es directa. Como en todos los transformadores se cumple que:

$$\dot{z}_1 \cong \dot{z}'_2 \ll \dot{Z}_0 \quad (20)$$

La impedancia \dot{Z}_0 se puede desplazar a los terminales de entrada o a los de salida del transformador, o incluso, para algunos cálculos, suprimirla, sin cometer errores importantes. Los circuitos equivalente que resultan se denominan “*aproximados*”, son de resolución directa y se los emplea frecuentemente.

Por ejemplo un circuito equivalente aproximado con la impedancia paralelo trasladada a los terminales de entrada, se muestra en la figura 7.

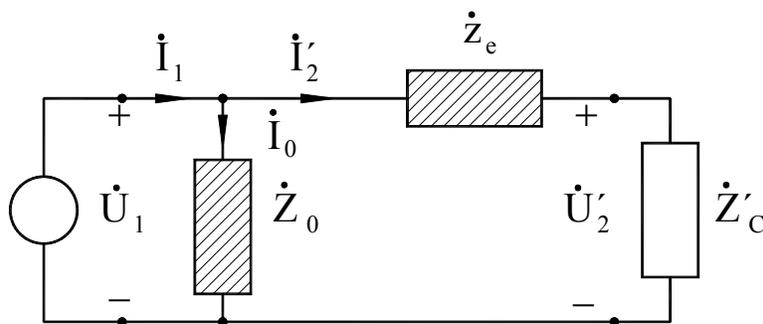


Fig. 7. Circuito equivalente aproximado.

$$\dot{z}_e = \dot{z}_1 + \dot{z}'_2 \quad (21)$$

Este es el circuito normalmente utilizado para la determinación de los parámetros y del rendimiento del transformador.

Para el cálculo de las corrientes y de las caídas de tensión se emplean circuitos sin rama en paralelo, como el de la figura 8.

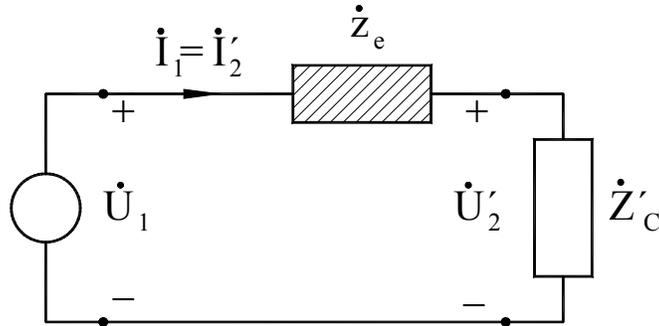


Fig. 8. Circuito equivalente aproximado sin rama en paralelo.

Estas simplificaciones son posibles debido a lo dicho en la introducción: las diferencias entre los transformadores reales y los ideales son pequeñas.

En algunos casos particulares y en transformadores de gran potencia, es posible hacer aún más simplificaciones, como ser despreciar la resistencia equivalente r_e o hasta suponerlos ideales.

5 VALORES NOMINALES

Las principales características de las máquinas vienen dadas por los fabricantes en la denominada *placa o chapa de características*; donde se especifican, entre otras cosas, la potencia de salida, las tensiones, las corrientes, la frecuencia, la velocidad de giro, etc. Las normas establecen los datos mínimos que deben figurar en estas placas, que deben estar colocadas en un lugar bien visible, e impresas en forma indeleble. Cuanto mayor es la importancia de la máquina, mayor es la información que da el fabricante.

Estos valores dados en lo placa de características se toman como los *nominales* de la máquina.

Las magnitudes especificadas por los fabricantes, en la chapa de características, corresponden a un *servicio*, que si no se dice nada al respecto, se sobreentiende que se trata de *servicio continuo* o *S1* que es el más común de los servicios e indica que la máquina puede funcionar a potencia nominal constante, sin límite de tiempo, y alcanzar el equilibrio térmico con el medio ambiente.

Para el caso de transformadores de dos arrollamientos se debe dar como mínimo, los valores nominales dados en la tabla II.

Tabla II. Valores nominales mínimos de un transformador.

Potencia aparente nominal	S_n
Tensión primaria nominal	U_{1n}
Tensión secundaria nominal	U_{2n}
Frecuencia nominal	f_n

Muy frecuentemente se agregan las corrientes primaria y secundaria nominales, las conexiones, los resultados de ensayos, pesos, dimensiones, etc. Tampoco debe faltar el nombre del fabricante.

La potencia aparente nominal de un transformador de dos arrollamientos está definida de la siguiente manera:

$$S_n = U_{1n} I_{1n} = U_{2n} I_{2n} \quad (22)$$

Conocida esta potencia y las tensiones nominales se pueden calcular las corrientes nominales como:

$$I_{1n} = \frac{S_n}{U_{1n}} \quad I_{2n} = \frac{S_n}{U_{2n}} \quad (23)$$

Para que las tensiones nominales resulten independientes del estado de carga del transformador, se especifican *en vacío*; por lo tanto la relación de transformación calculada a partir de las tensiones nominales dadas por el fabricante, debería coincidir con la que realmente tiene el transformador:

$$a \cong \frac{U_{1n}}{U_{2n}} = \frac{I_{2n}}{I_{1n}} = a_n \quad (24)$$

Cuando el transformador esté en carga, la máxima corriente que se le puede exigir al secundario, para el servicio especificado en la placa de características, es la nominal; en estas condiciones la corriente absorbida por el primario, dependiendo del factor de potencia de la carga, generalmente es un poco más grande que la nominal, porque se le suma la corriente de vacío. Por otro lado, si la tensión de alimentación es la nominal, debido a las caídas internas, la tensión de salida es, dependiendo también del factor de potencia de la carga, ligeramente distinta a la nominal, en la figura 9 se muestran estas condiciones de funcionamiento.

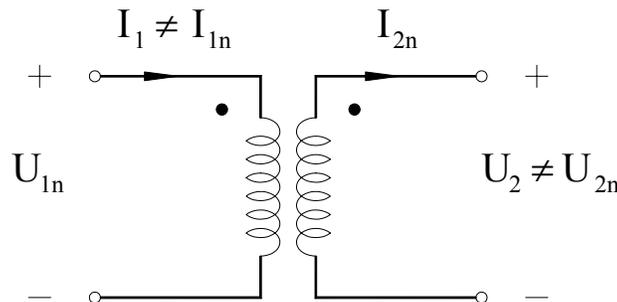


Fig. 9. Valores en carga.

Y por los mismos motivos, si el transformador está en carga, y se desea tener a la salida la tensión nominal; la tensión primaria deberá ser ligeramente distinta a la nominal, si la carga es inductiva, deberá ser un poco mayor.

Los valores nominales no representan máximos absolutos, que no se pueden superar, por el contrario todas las máquinas son factibles de ser sobrecargadas transitoriamente sin que se produzcan daños, pero se debe proceder con gran prudencia y conocimiento de causa ya que las sobrecargas producen mayores calentamientos y acortan la vida útil de los materiales aislantes y consecuentemente de la máquina.

6 LA DETERMINACIÓN DE LOS PARÁMETROS

En la etapa de diseño de un transformador, o para hacer alguna verificación, los parámetros del circuito equivalente se pueden determinar a partir del conocimiento de las dimensiones y de los materiales utilizados en el mismo.

La determinación de los parámetros a partir de ensayos es mucho más sencilla y son los procedimientos que se siguen para verificar el funcionamiento de los transformadores. A continuación se hace un resumen de los principales ensayos. Todas estas mediciones se encuentran ampliamente detallados en las normas sobre el tema y son la base de la certificación de los transformadores.

6.1 Medición de resistencias

Las resistencias de los bobinados se miden con corriente continua, normalmente con puentes como el de Wheatstone o el de Thomson, dependiendo de su valor, y es importante tomar nota de la temperatura a la que se realiza la medición, debido a la gran variación de resistividad que presenta el cobre. Las normas establecen que los resultados se deben ser referidos a temperaturas específicas, como ser 75 C, y dan las expresiones de cálculo.

6.2 Medición de la relación de transformación

La forma más sencilla de obtener la relación de transformación de un transformador es alimentarlo con una tensión igual o menor a la nominal y medir las tensiones del primario y del secundario cuando este último está en vacío.

La relación resulta:

$$a = \frac{U_1}{U_2} \text{ En vacío.} \quad (25)$$

A fin de mejorar la exactitud del resultado se suelen hacer varias mediciones y promediar los resultados o emplear instrumentos más elaborados denominados “relaciómetros”.

6.3 Ensayo en vacío

Si al primario de un transformador, que tiene su secundario desconectado, se le aplican tensión y frecuencia nominales, toda la potencia que absorbe será de pérdidas, ya que es nula la corriente secundaria. La corriente primaria medida en estas condiciones, se denomina *corriente de vacío* y es mucho menor que la nominal. Por lo tanto las pérdidas por efecto Joule en la resistencia del bobinado primario serán despreciables, ya que dependen del cuadrado de la corriente, mientras que en el bobinado secundario no habrá pérdidas, porque al estar en vacío, no hay corriente.

Por otro lado, las pérdidas en el núcleo de hierro dependen de la tensión y de la frecuencia aplicadas, y como ambas son nominales, también lo será esas pérdidas. Por lo tanto la indicación del wattímetro corresponde a las pérdidas en el hierro nominales del transformador.

$$P_0 = P_{Fen} \quad (26)$$

Si en el ensayo se miden los valores de la tensión, la corriente y la potencia absorbidas, se pueden calcular fácilmente los parámetros de la rama paralelo del circuito equivalente.

6.4 Ensayo en cortocircuito

Se realiza aplicando al transformador, con su secundario en cortocircuito, una tensión reducida, de frecuencia nominal, denominada *tensión de cortocircuito*, tal que haga circular las corrientes nominales del primario y del secundario, de esta manera las pérdidas en el cobre de ambos arrollamientos serán nominales. Por otra parte, al ser nula la tensión secundaria debida al cortocircuito, el transformador no entrega potencia y las pérdidas en el hierro resultan despreciables por el bajo valor de la tensión de cortocircuito; en consecuencia la potencia absorbida por el transformador será la suma de las pérdidas en el cobre de ambos arrollamientos.

$$P_{cc} = P_{Cun} \quad (26)$$

Si en el ensayo se miden los valores de la tensión, la corriente y la potencia absorbidas, se pueden calcular fácilmente los parámetros de la rama serie del circuito equivalente.

6.5 Otros ensayos

A fin de garantizar el buen funcionamiento del transformador, y de acuerdo a lo establecido en las normas, se deben realizar otros ensayos en los transformadores, por ejemplo los ensayos de calentamiento, de verificación de aislación y resistencia a cortocircuitos. Cuanto más grande son las unidades y mayor su valor económico, mayor es la minuciosidad con que se los examina, incluyendo, por ejemplo, ensayos mecánicos, ruido y de todos los equipos auxiliares.

7 BIBLIOGRAFÍA

- EE Staff del MIT: “*Circuitos Magnéticos y Transformadores*” Editorial Reverté, 1943.
- A. E. Fitzgerald, C. Kingsley y A. Kusko: “*Máquinas Eléctricas*” Ed. Mac Graw Hill, 1975.
- Stephen J. Chapman: “*Máquinas Eléctricas*” Editorial Mac Graw Hill, 2005.
- B. S. Guru y H. R. Hiziroğlu: “*Máquinas Eléctricas y Transformadores*” Editorial Oxford University Press, 2003.

Ing. Norberto A. Lemozy
2009