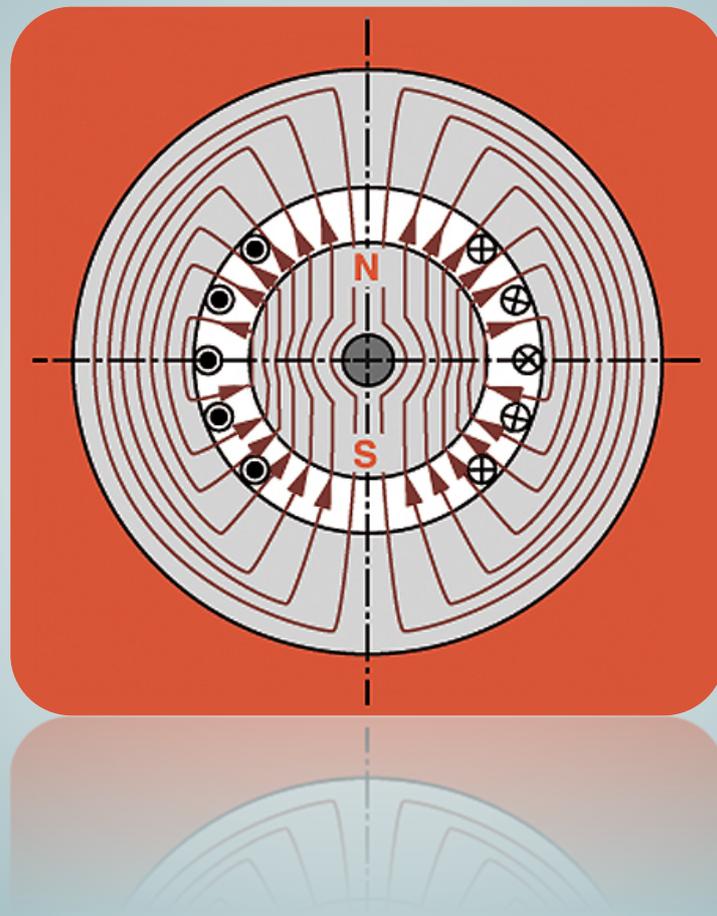


Máquinas Eléctricas I - G862

Tema 2. Transformadores



Miguel Ángel Rodríguez Pozueta

Departamento de Ingeniería Eléctrica y Energética

Este tema se publica bajo Licencia:

[Creative Commons BY-NC-SA 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

© 2015, Miguel Angel Rodríguez Pozueta

Universidad de Cantabria (España)

Departamento de Ingeniería Eléctrica y Energética

This work is licensed under the Creative Commons Attribution-NonCommercial-ShareAlike 4.0 International License. To view a copy of this license, visit <http://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/> or send a letter to Creative Commons, PO Box 1866, Mountain View, CA 94042, USA.



Está permitida la reproducción total o parcial de este documento bajo la licencia Creative Commons Reconocimiento-NoComercial-CompartirIgual 4.0 Unported que incluye, entre otras, la condición inexcusable de citar su autoría (Miguel Angel Rodríguez Pozueta - Universidad de Cantabria) y su carácter gratuito.

*Puede encontrar más documentación gratuita en la página web del autor:
<http://personales.unican.es/rodrigma/primer/publicaciones.htm>*

ÍNDICE

TRANSFORMADORES

Descripción de un transformador	1
Valores asignados o nominales	6
Circuito equivalente de un transformador monofásico	6
Separación de los efectos de las resistencias y de los flujos de dispersión. Convenios de signos	7
Marcha industrial	9
Marcha en vacío	9
Ecuación del circuito magnético	11
Reducción al primario	11
Circuito equivalente	13
Circuito equivalente aproximado. Tensiones relativas de cortocircuito	14
Circuito equivalente aproximado	14
Tensiones relativas de cortocircuito	15
Falta o fallo de cortocircuito	16
Intensidades y tensiones en un transformador en carga	18
Relación entre las corrientes I_1 e I_2 en un transformador en carga	18
Caída de tensión	18
Balance de potencias. Rendimiento	20
Balance de potencias	20
Rendimiento de un transformador	22
Consecuencias prácticas	23
Corriente de vacío de un transformador monofásico	24
Autotransformadores	26
Transformadores de medida y de protección	27
Bibliografía	30

ÍNDICE

ANEXO A: Ensayos de transformadores monofásicos	31
Ensayo de vacío	31
Ensayo de cortocircuito	33
ANEXO B: Diagrama de Kapp. Caída de tensión	37
Diagrama y triángulo de Kapp	37
Caída de tensión.....	38

Los números de página de este índice son hipervínculos a dichas páginas

TRANSFORMADORES

Miguel Angel Rodríguez Pozueta

DESCRIPCIÓN DE UN TRANSFORMADOR

Los transformadores son máquinas estáticas con dos devanados¹ de corriente alterna arrollados sobre un núcleo magnético (Fig. 1). El devanado por donde entra energía al transformador se denomina **primario** y el devanado por donde sale energía hacia las cargas² que son alimentadas por el transformador se denomina **secundario**. El devanado primario tiene N_1 espiras y el secundario tiene N_2 espiras. El circuito magnético de esta máquina lo constituye un núcleo magnético sin entrehierros, el cual no está realizado con hierro macizo sino con chapas de acero al silicio apiladas y aisladas entre sí (véanse las Figs. 2, 3 y 4). De esta manera se reducen las pérdidas magnéticas del transformador.

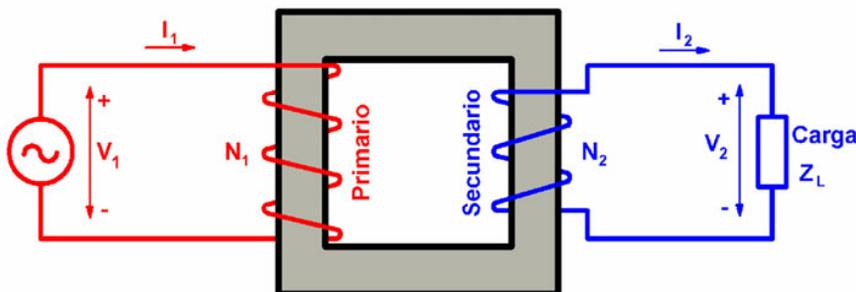


Fig. 1: Principio de funcionamiento de un transformador monofásico

Al conectar una tensión alterna V_1 al primario, circula una corriente por él que genera un flujo alterno en el núcleo magnético. Este flujo magnético, en virtud de la Ley de Faraday, induce en el secundario una fuerza electromotriz (f.e.m.) E_2 que da lugar a una tensión V_2 en bornes de este devanado. De esta manera se consigue transformar una tensión alterna de valor eficaz V_1 en otra de valor eficaz V_2 y de la misma frecuencia. Nótese que esta máquina sólo vale para transformar tensiones alternas, pero no sirve para tensiones continuas.

El **devanado de alta tensión** (A.T.) es el de mayor tensión y el **devanado de baja tensión** (B.T.) es el de menor tensión. Un **transformador elevador** tiene el lado de baja tensión en el primario y el de A.T. en el secundario. Un **transformador reductor** tiene el lado de alta tensión en el primario y el de B.T. en el secundario.

El transformador es una máquina reversible. Un mismo transformador puede alimentarse por el lado A.T. y funcionar como transformador reductor o alimentarse por el lado de B.T. y actuar como un transformador elevador.

En las Figs. 2 se muestran dos **transformadores monofásicos**. El transformador de la Fig. 2a es un transformador monofásico **de columnas**. En este transformador el núcleo magnético tiene forma rectangular y consta de dos columnas (donde se arrollan los devanados) y dos yugos o culatas, todos de igual sección. Aunque para facilitar el análisis teórico del transformador se suele dibujar con un devanado arrollado sobre una columna y el otro sobre la

¹ Los términos *devanado*, *bobinado* y *arrollamiento* son sinónimos y en este texto se utilizarán indistintamente.

² Se denomina *carga* a un elemento que consume potencia. También se denomina *carga de un transformador* a la potencia que suministra. En consecuencia, se dice que un transformador está *en carga* cuando está proporcionando una potencia no nula por su devanado secundario.

otra columna (Fig. 1), la realidad es que en un transformador de columnas se bobina primero el devanado de menor tensión (devanado de B.T.) repartido entre las dos columnas (mitad en una columna y mitad en la otra), se coloca una capa de material aislante sobre este primer devanado y se bobina ahora el devanado de mayor tensión (el devanado de A.T.) sobre el anterior y también repartido mitad en una columna y mitad en la otra. De esta manera se reducen los flujos de dispersión (debidos a las líneas de campo magnético generadas por un devanado y que no llegan al otro). En la Fig. 2b se muestra un transformador monofásico **acorazado**, el cual tiene un núcleo magnético de tres columnas, teniendo la columna central doble sección que las otras columnas y que los yugos. Los dos devanados se bobinan sobre la columna central, uno sobre el otro y con una capa aislante intermedia. Al estar los devanados más rodeados del hierro del núcleo magnético, se consigue en los transformadores acorazados que los flujos de dispersión sean menores que en los de columnas.

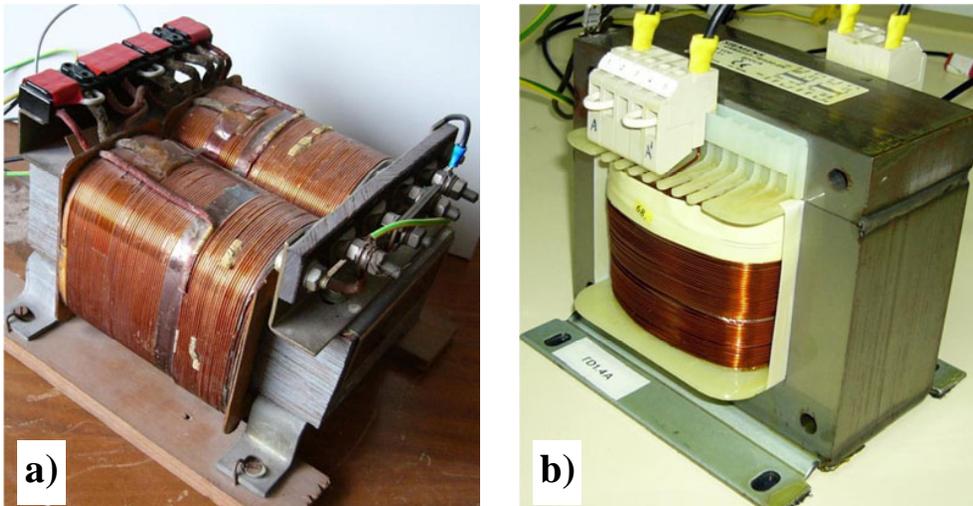


Fig. 2: Transformadores monofásicos: a) De columnas; b) Acorazado

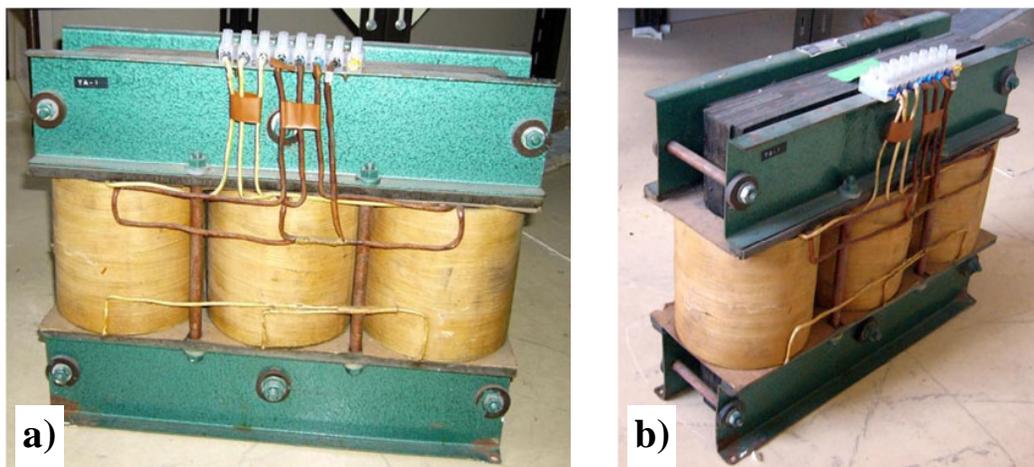


Fig. 3: Transformadores trifásicos de tres columnas

Los **transformadores trifásicos** más habituales suelen ser **de tres columnas** (Figs. 3). El núcleo magnético de estos transformadores tiene tres columnas de igual sección e igual a la de los yugos. Sobre cada columna se bobinan (uno sobre el otro con una capa de aislamiento intermedia) los dos devanados (primario y secundario) de una de las fases. Las tres fases del primario se conectan entre sí en estrella, en triángulo o mediante una conexión especial denominada zig-zag que se estudiará más adelante. Análogamente sucede con las tres fases del secundario.

También existen otros tipos de transformadores trifásicos: **de cinco columnas** (con dos columnas adicionales sin devanados a ambos lados del núcleo magnético) y **acorazados**.

En una red trifásica, además de un transformador trifásico, también se puede utilizar un **banco de tres transformadores monofásicos**. Los primarios de los tres transformadores monofásicos se pueden conectar en estrella o en triángulo y lo mismo pasa con los secundarios.



Fig. 4: Detalle de la columna de un transformador trifásico

La Fig. 4 muestra la sección de una de las columnas de un transformador trifásico. En ella se aprecia como está construida a base de apilar chapas de acero de pequeño espesor y que, en este caso, tiene una sección escalonada y no rectangular, a diferencia de los transformadores de las Figs. 2. Esta forma escalonada para las columnas se adopta en transformadores a partir de cierta potencia, ya que proporciona a las espiras de los bobinados una forma más próxima a la circular, que es la que permite soportar mejor los esfuerzos mecánicos a los que se ven sometidas si se producen cortocircuitos.

Las Figs. 2 y 3 muestran varios **transformadores secos**. En ellos el calor generado durante el funcionamiento de la máquina se evacua hacia el aire circundante a través de su superficie externa.

Hoy en día se utilizan bastante los transformadores secos encapsulados en resina epoxi, en los cuales el devanado de alta tensión está totalmente encapsulado en una masa de resina epoxi. Estos transformadores son muy seguros al no propagar la llama y ser autoextinguibles.

Para potencias altas tradicionalmente se han empleado los **transformadores en baño de aceite** (Figs. 5), los cuales tienen su parte activa (núcleo magnético y devanados) en el interior de una cuba llena de aceite mineral o aceite de siliconas. En estos transformadores el aceite realiza una doble función: aislante y refrigerante. El calor generado por la parte activa del transformador se transmite al aceite y este evacua el calor al aire ambiente a través de la superficie externa de la cuba. Para facilitar la transmisión de calor a través de la cuba ésta posee aletas o radiadores que aumentan su superficie externa. En algunos casos el aceite es refrigerado por otro fluido (por ejemplo, agua) a través de un intercambiador de calor.

En su forma clásica, la cuba de un transformador en baño de aceite posee un **depósito de expansión** o **conservador** en su parte superior (Figs. 5). Este depósito, en forma de cilindro horizontal, sirve para absorber las variaciones de volumen del aceite de la cuba provocadas por el calentamiento de la máquina cuando está funcionando. Además, de esta manera se reduce la superficie de contacto entre el aceite y el aire, lo que alarga la vida útil del aceite. Por otra parte, la entrada de aire al depósito de expansión suele realizarse a través de un pequeño depósito de silicagel o gel de sílice que lo deseca, mejorando así la conservación del aceite de la cuba. En efecto, el gel de sílice es una sustancia que se presenta en forma de bolitas y que muestra una gran capacidad para absorber la humedad del aire. El depósito de expansión incluye un nivel de aceite, que consiste en una ventana o en un tubo de cristal (ver la Fig. 5b) que permite vigilar que el nivel del aceite es el adecuado.

En la parte superior del depósito de expansión está el tapón de llenado del aceite (ver la Fig. 5a), mientras que en la parte inferior de la cuba se encuentra el grifo de vaciado (Fig. 6a).

TRANSFORMADORES



a) *Fig. 5: Transformadores en baño de aceite* **b)**
1: Depósito de expansión;
2: Tapón de llenado
3: Nivel de aceite
4: Cuba del transformador
5: Radiadores
6: Pasatapas de A.T.
7: Ventiladores para enviar aire hacia los radiadores

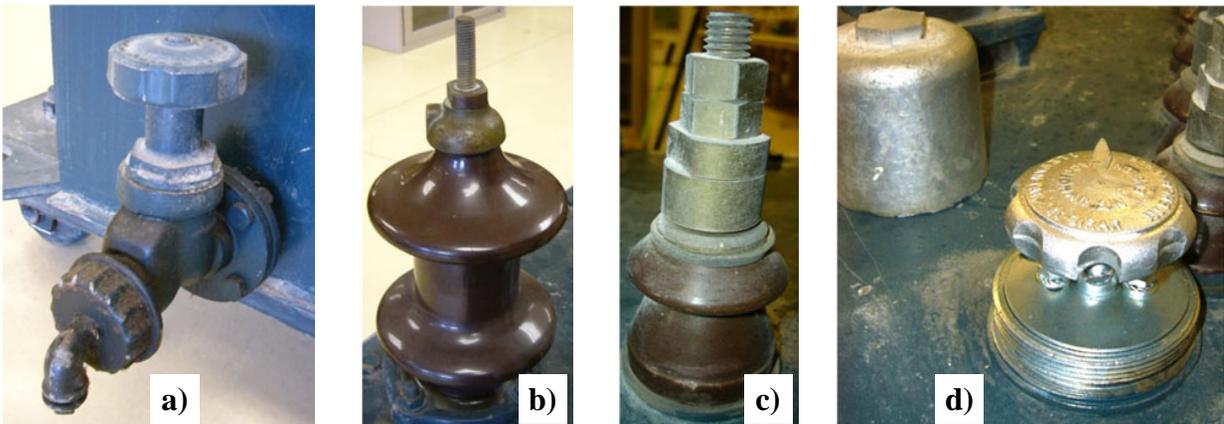


Fig. 6: Elementos de un transformador en baño de aceite:
a) Grifo de vaciado **b)** Aislador pasatapas de A.T.
c) Aislador pasatapas de B.T. **d)** Mando del conmutador de tensiones

Los bornes de los transformadores de media tensión se sacan al exterior de la cuba a través de **aisladores pasantes** o **pasatapas** de porcelana (Figs. 5b, 6b y 6c), que son tanto más altos cuanto mayor es la tensión que deben soportar.

Los transformadores usualmente disponen de un **conmutador** o **regulador de tensión** (Fig. 6d) que permite modificar ligeramente la relación de transformación de la máquina (normalmente $\pm 5\%$) para adaptarla a las necesidades concretas de cada aplicación. Estos conmutadores pueden ser sin tensión (se deben accionar con el transformador desconectado) o bajo carga (pueden accionarse con el transformador con tensión y con carga).

Los transformadores en baño de aceite suelen incorporar varios elementos de protección: por temperatura, por nivel de aceite, relé Buchholz,....

El **relé Buchholz** detecta las burbujas de gas que se producen cuando se quema el aceite debido a un calentamiento anormal del transformador. Por lo tanto, este relé permite proteger al transformador de sobrecargas, cortocircuitos, fallos de aislamiento, etc.

Hoy día los transformadores en baño de aceite son frecuentemente de **llenado integral**, en los cuáles la cuba es hermética y está completamente llena de aceite. La deformación de los pliegues de la cuba absorbe las presiones debidas a las dilataciones del líquido debidas al calor.

Según la Comisión Electrotécnica Internacional (CEI), el **tipo de refrigeración** de un transformador se designa mediante cuatro letras. Las dos primeras se refieren al refrigerante primario (el que está en contacto directo con la parte activa de la máquina) y las dos últimas se refieren al refrigerante secundario (que enfría al refrigerante primario). De cada par de letras, la primera indica de qué fluido se trata y la segunda señala su modo de circulación (Tabla I).

Tabla I: Designación de la refrigeración de un transformador

Tipo de Fluido	Símbolo	Tipo de circulación	Símbolo
Aceite mineral	O	Natural	N
Pyraleno	L	Forzada	F
Gas	G		
Agua	W		
Aire	A		
Aislante sólido	S		

Así, un transformador ONAN es un transformador en baño de aceite en el que el aceite es el refrigerante primario y se mueve por convección natural; es decir, por las diferentes densidades que tienen el aceite caliente, en contacto con la parte activa, y el aceite frío, enfriado por el refrigerante secundario. El refrigerante secundario es, en este ejemplo, el aire que rodea a la cuba del transformador, el cual circula también por convección natural. Un transformador ONAF (Fig. 5b) es un transformador en baño de aceite similar al ONAN, salvo que en este caso el aire se envía hacia la cuba mediante ventiladores (circulación forzada del aire).

Los transformadores secos, que carecen de refrigerante secundario, se designan mediante sólo dos letras. Así, un transformador AN (Figs. 2 y 3) es un transformador seco refrigerado por el aire ambiente que circula por convección natural.

En la Fig. 7 se muestran algunos de los símbolos empleados para representar transformadores. Los tres primeros se refieren a transformadores monofásicos y los tres últimos a transformadores trifásicos.

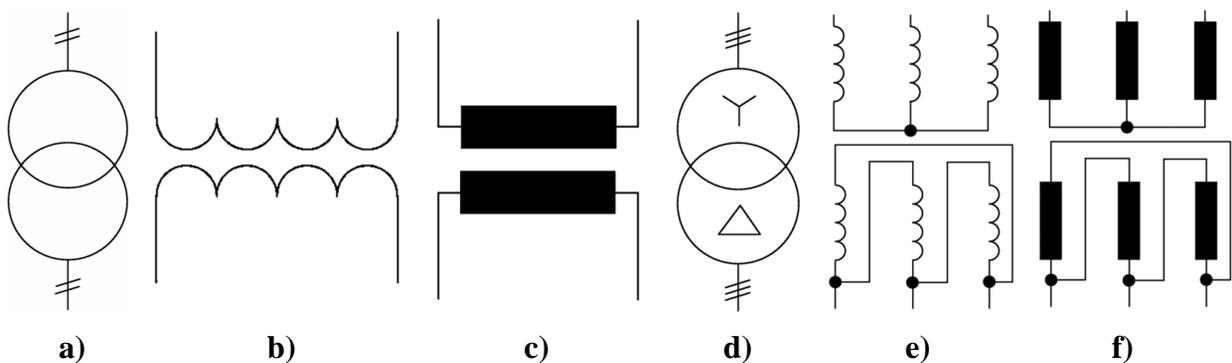


Fig. 7: Símbolos de transformadores

VALORES ASIGNADOS O NOMINALES

Las **tensiones asignadas o nominales** (V_{1N} , V_{2N}) son aquellas para las que se ha diseñado el transformador. Estas tensiones son proporcionales al número de espiras (N_1 y N_2) de cada devanado.

La **potencia asignada o nominal** (S_N) es la potencia aparente del transformador que el fabricante garantiza que no produce calentamientos peligrosos durante un funcionamiento continuo de la máquina. Los dos devanados del transformador tienen la misma potencia asignada.

Las **corrientes nominales o asignadas** (I_{1N} , I_{2N}) se obtienen a partir de las tensiones asignadas y de la potencia asignada. Así, en un transformador monofásico se tiene que:

$$S_N = V_{1N} \cdot I_{1N} = V_{2N} \cdot I_{2N} \quad (1)$$

La **relación de transformación** (m) es el cociente entre las tensiones asignadas del primario y del secundario:

$$m = \frac{V_{1N}}{V_{2N}} \quad (2)$$

Teniendo en cuenta la relación (1) y que las tensiones asignadas son proporcionales a los respectivos números de espiras, se deduce que

$$m = \frac{N_1}{N_2} = \frac{V_{1N}}{V_{2N}} = \frac{I_{2N}}{I_{1N}} \quad (3)$$

La **relación de transformación asignada** es el cociente entre las tensiones asignadas del bobinado de A.T. y del bobinado de B.T.:

$$\frac{V_{ATN}}{V_{BTN}} \quad (4)$$

Por consiguiente, en un transformador reductor la relación de transformación asignada es igual a la relación de transformación m , mientras que en un transformador elevador es igual a la inversa de m .

CIRCUITO EQUIVALENTE DE UN TRANSFORMADOR MONOFÁSICO

El circuito equivalente de un transformador representa de una manera sencilla y bastante exacta el funcionamiento de un transformador real.

Mediante esta técnica, el análisis de un transformador se va a reducir a la resolución de un sencillo circuito eléctrico de corriente alterna.

Separación de los efectos de las resistencias y de los flujos de dispersión. Convenios de signos

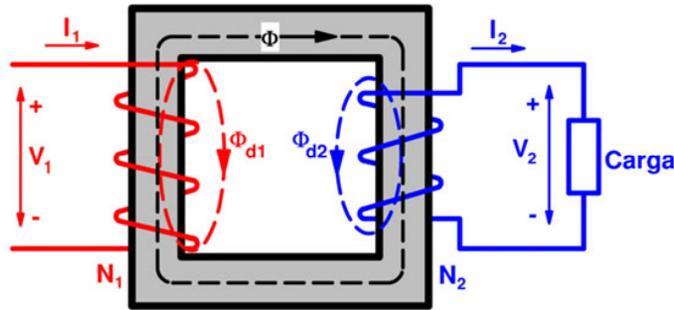


Fig. 8: Transformador en carga

En la Fig. 8 está representado el esquema de un transformador real en carga. En él están reflejados los convenios de signos que se van a utilizar en este texto para analizar esta máquina. Es preciso señalar que otros autores emplean unos convenios de signos diferentes, lo que deberá ser tenido en cuenta por el lector si consulta otros libros.

Para las corrientes y los flujos se ha adoptado un criterio de signos tal que cuando la corriente de primario, I_1 , es positiva crea (siguiendo la regla del sacacorchos) un flujo común, Φ , positivo; pero una corriente secundaria, I_2 , positiva genera un flujo Φ negativo. Los devanados tienen, respectivamente, unas resistencias R_1 y R_2 y generan unos flujos de dispersión Φ_{d1} y Φ_{d2} , además del flujo común Φ . El flujo Φ_{d1} es la parte del flujo generado en el devanado primario que no es abrazada por el devanado secundario y el flujo Φ_{d2} es la parte del flujo creado en el devanado secundario que no es abrazada por el devanado primario. El convenio de signos adoptado para los flujos de dispersión es tal que una corriente I_1 positiva genera un flujo de dispersión Φ_{d1} positivo y, análogamente, una corriente I_2 positiva da lugar a un flujo Φ_{d2} positivo.

Las líneas de campo magnético correspondientes a los flujos de dispersión tienen un recorrido que incluye el núcleo magnético (de hierro), pero también el fluido que rodea al núcleo y, en su caso, la cuba del transformador. Esto significa que los flujos Φ_{d1} y Φ_{d2} circulan en gran medida fuera del hierro (luego, apenas les afecta el grado de saturación que exista en el núcleo magnético) y, además, sólo son debidos a una de las corrientes I_1 e I_2 , respectivamente. Por consiguiente, su efecto equivale al de unas bobinas con coeficientes de autoinducción prácticamente constantes dados por estas relaciones:

$$L_{d1} = N_1 \frac{\Phi_{d1}}{I_1} \quad L_{d2} = N_2 \frac{\Phi_{d2}}{I_2} \quad (5)$$

Las **reactancias de dispersión** X_1 y X_2 debidas a estos coeficientes de autoinducción valen:

$$X_1 = 2 \pi f L_{d1} \quad X_2 = 2 \pi f L_{d2} \quad (6)$$

donde f es la frecuencia.

Por lo tanto, para facilitar su análisis, el transformador de la Fig. 8 se lo sustituye por otro ideal en el que los devanados carecen de resistencia y de flujo de dispersión, pero al que se han conectado en serie con cada devanado una resistencia y una autoinducción para que se comporte como el transformador real de la Fig. 8. Así se obtiene el transformador de la Fig. 9.

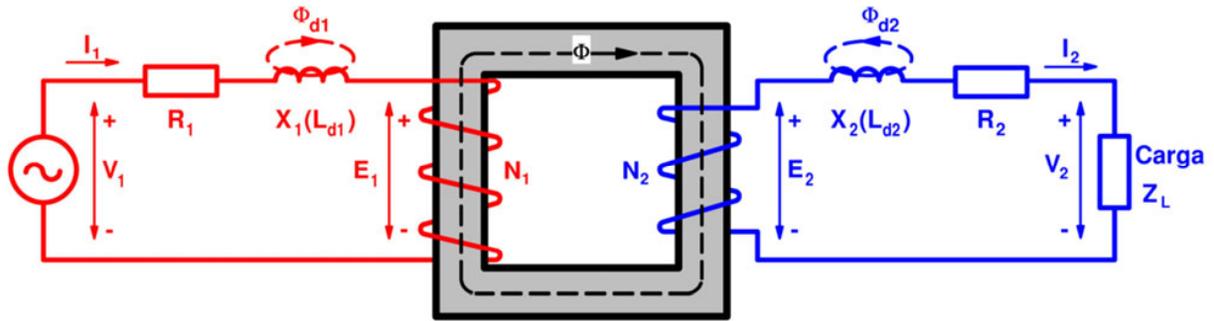


Fig. 9: Separación de las resistencias y de las reactancias de dispersión

Se denominan e_1 y e_2 a los respectivos valores instantáneos de las f.e.m.s inducidas por el flujo común Φ sobre los devanados primario y secundario. Realmente, aunque por comodidad se van a denominar f.e.m.s a e_1 y e_2 , se va a adoptar para ellas el convenio de signos correspondiente a las fuerzas contraelectromotrices (f.c.e.m.s). Esto significa que la *Ley de Faraday* se debe aplicar en este caso con signo +:

$$e_1 = + \frac{d \Psi_1}{d t} = N_1 \frac{d \Phi}{d t} \quad e_2 = + \frac{d \Psi_2}{d t} = N_2 \frac{d \Phi}{d t} \quad (7)$$

El convenio de signos para estas f.e.m.s es, pues, que e_1 y e_2 positivas intentan generar corrientes que originen un flujo común Φ negativo. Este convenio está representado en la Fig. 9.

En efecto, el signo de una f.e.m. viene dado por la *Ley de Lenz*: “el signo de una f.e.m. es tal que se opone a las variaciones de flujo que la generan”.

Según la expresión (7), e_1 será positiva si la derivada del flujo también lo es; es decir, si el flujo está aumentando. En estas condiciones e_1 será tal que intente evitar que el flujo común Φ aumente y, en consecuencia, tratará de originar una corriente en el devanado primario que dé lugar a un flujo negativo. En resumen, e_1 tendrá signo positivo cuando intente generar una corriente I_1 negativa, que es lo que está representado en la Fig. 9.

Análogamente, cuando e_2 sea positiva tratará de originar una corriente en el devanado secundario que provoque un flujo negativo. Luego e_2 tendrá signo positivo cuando intente generar una corriente I_2 positiva (recuerde el convenio de signos para las corrientes y los flujos), que es lo que está representado en la Fig. 9.

Si Φ_M es el valor máximo del flujo común, los valores eficaces E_1 y E_2 de e_1 y e_2 , respectivamente, se obtienen mediante las siguientes relaciones deducidas a partir de la (7):

$$E_1 = 4,44 N_1 f \Phi_M \quad E_2 = 4,44 N_2 f \Phi_M \quad (8)$$

De (8) se obtiene que el cociente entre estas f.e.m.s es igual a la relación de transformación m :

$$\frac{E_1}{E_2} = \frac{N_1}{N_2} = m \quad (9)$$

El transformador absorbe potencia por el primario. Por esta razón, se ha adoptado para V_1 el convenio de signos de *carga*: es la tensión V_1 de la red que alimenta al primario la que origina la corriente I_1 . Luego, la tensión V_1 será positiva cuando dé lugar a una corriente I_1 positiva (como se ha representado en la Fig. 9).

Sin embargo, el transformador suministra potencia por su secundario, por lo que se ha adoptado para V_2 el convenio de signos *generador*: la corriente I_2 es generada por f.e.m. E_2 y la tensión V_2 se opone a I_2 . Por lo tanto, una tensión V_2 positiva tiende a que la corriente I_2 sea negativa (como se ha representado en la Fig. 9).

Observando la Fig. 9 se deduce que se verifican las siguientes relaciones:

$$\begin{aligned}\bar{V}_1 &= \bar{E}_1 + R_1 \bar{I}_1 + j X_1 \bar{I}_1 \\ \bar{E}_2 &= \bar{V}_2 + R_2 \bar{I}_2 + j X_2 \bar{I}_2\end{aligned}\tag{10}$$

Marcha industrial

Se dice que un transformador funciona con una marcha industrial cuando su primario se encuentra alimentado a la tensión y frecuencia asignadas. Por lo tanto, lo habitual es que un transformador esté funcionando con una de estas marchas.

Hay muchas marchas industriales, siendo las más significativas la marcha en vacío, cuando el transformador no tiene ninguna carga en el secundario, y la marcha asignada o nominal, cuando funciona suministrando la potencia asignada.

Si en todas las marchas industriales la tensión y la frecuencia primarias son las mismas (la tensión y la frecuencia asignadas), el valor eficaz E_1 de la f.e.m. primaria también es prácticamente igual en todas ellas (en la primera de las ecuaciones (10) las caídas de tensión en R_1 y X_1 son muy pequeñas frente a E_1). En consecuencia, de acuerdo con (8) el valor máximo Φ_M del flujo magnético común prácticamente conserva el mismo valor en todas las marchas industriales.

Como se estudiará más adelante, en un transformador se producen las denominadas pérdidas³ en el hierro, P_{Fe} , que es la potencia perdida debida a los fenómenos de la histéresis magnética y de las corrientes de Foucault. Estas pérdidas tienen un valor proporcional al valor máximo del campo magnético común (o, lo que es equivalente, al valor máximo del flujo magnético común, Φ_M) y a la frecuencia. En consecuencia, en todas las marchas industriales de un transformador las pérdidas en el hierro P_{Fe} tienen prácticamente el mismo valor.

Marcha en vacío

Un transformador se dice que funciona **en vacío** (Fig. 10) cuando su primario se conecta a la tensión asignada (V_{1N}) y su secundario se deja en circuito abierto (luego, $I_2 = 0$). La marcha en vacío es, pues, una de las marchas industriales del transformador. Cuando un transformador funciona en vacío se denominan I_0 , P_0 , $\cos \varphi_0$ y V_{20} a la corriente primaria, a la potencia absorbida por el primario, al factor de potencia en el primario y a la tensión en bornes del secundario, respectivamente.

³ Se denomina *pérdidas* a una potencia que no se aprovecha (potencia perdida) y que se disipa en forma de calor.

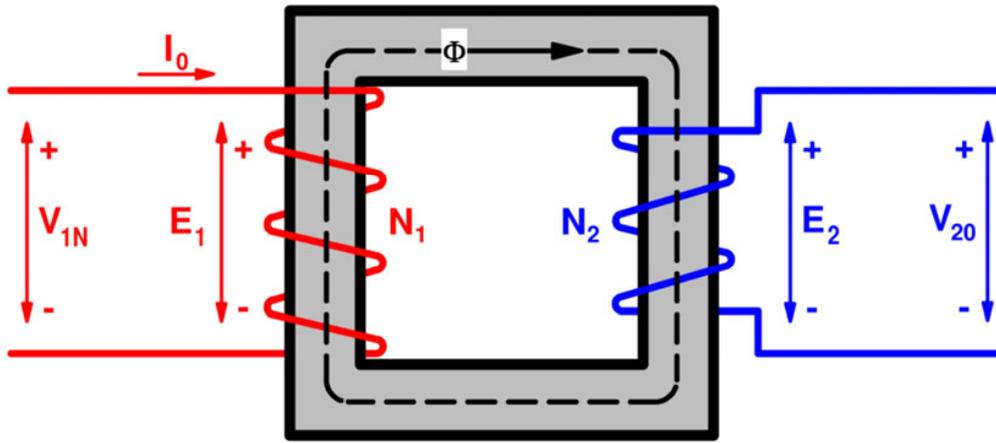


Fig. 10: Transformador en vacío

El valor eficaz I_0 de la corriente de vacío es tan pequeño (I_0 no suele superar el 5% de I_{1N}) que se pueden despreciar las caídas de tensión en el primario (caídas de tensión en la reactancia de dispersión X_1 y en la resistencia R_1 del devanado primario). Luego,

$$\text{En vacío: } V_1 = V_{1N} \text{ y, además, } I_0 \ll \rightarrow \bar{V}_1 = \bar{E}_1 \quad (11a)$$

Por otra parte, en vacío la corriente del secundario es nula, luego

$$I_2 = 0 \rightarrow \bar{V}_{20} = \bar{E}_2 \quad (11b)$$

Así pues, teniendo en cuenta las relaciones (2), (9) y (11), se deduce que

$$m = \frac{E_1}{E_2} = \frac{V_1}{V_{20}} \rightarrow V_{20} = \frac{V_1}{m}$$

Dado que $V_1 = V_{1N} \rightarrow \boxed{V_{20} = V_{2N}}$ (12)

Un transformador en carga absorbe por el primario la potencia activa P_1 . Una pequeña parte de esta potencia se pierde en la propia máquina, provocando su calentamiento, y el resto es la potencia activa P_2 que el transformador suministra por el secundario a las cargas alimentadas por él. En los devanados de la máquina se producen las denominadas pérdidas en el cobre en el primario y en el secundario, P_{Cu1} y P_{Cu2} , que son las debidas al efecto Joule cuando circulan las corrientes I_1 e I_2 por las resistencias R_1 y R_2 , respectivamente, de estos devanados. La potencia de pérdidas en el cobre totales, P_{Cu} , es la suma de las pérdidas en el cobre del primario y del secundario ($P_{Cu} = P_{Cu1} + P_{Cu2}$). Además, en el núcleo magnético del transformador se producen las pérdidas en el hierro, P_{Fe} . Más adelante se analizarán con más detalle las potencias en un transformador.

En vacío la potencia suministrada por el secundario (P_2) y las pérdidas en el cobre en el secundario (P_{Cu2}) son nulas (pues I_2 es nula) y las pérdidas en el cobre en el primario (P_{Cu1}) son muy pequeñas (pues I_0 es muy pequeña). Luego, en vacío la potencia activa consumida por el primario (P_0) prácticamente es igual a las pérdidas que se producen en el núcleo magnético o pérdidas en el hierro (P_{Fe}) de la máquina:

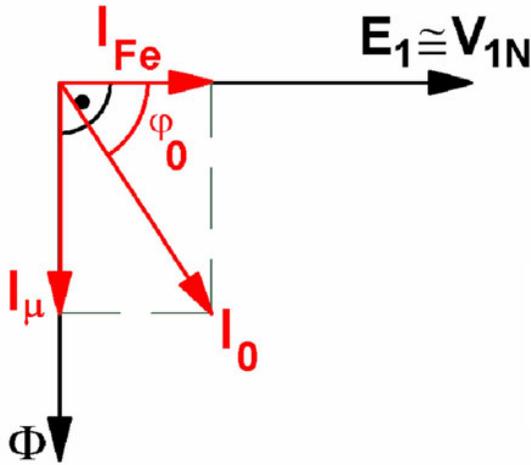


Fig. 11: Diagrama fasorial de un transformador en vacío

$$P_0 = P_{Fe} \quad (13)$$

Por consiguiente, durante la marcha en vacío el diagrama fasorial del transformador es el representado en la Fig. 11. En esta figura se observa que la corriente de vacío \bar{I}_0 se puede separar en dos componentes perpendiculares entre sí. Una de estas componentes, \bar{I}_μ , está en fase con el flujo común, $\bar{\Phi}$, y es la que genera dicho flujo. \bar{I}_μ es perpendicular a la f.e.m. \bar{E}_1 y a la tensión \bar{V}_1 , luego no da lugar a ningún consumo potencia activa. Es preciso, pues que exista además otra componente, \bar{I}_{Fe} , de la corriente \bar{I}_0 que esté en fase con la tensión \bar{V}_1 del primario y origine el consumo de la potencia P_0 . Luego, se tiene que:

$$\bar{I}_0 = \bar{I}_{Fe} + \bar{I}_\mu \quad (14)$$

Ecuación del circuito magnético

En vacío el flujo común Φ es originado únicamente por la corriente I_0 , mientras que en carga es debido a la acción conjunta de las corrientes I_1 e I_2 . Si ambos estados corresponden a marchas industriales, el flujo común prácticamente conserva el mismo valor en ellos y, por tanto, la fuerza magnetomotriz total del circuito magnético también es prácticamente la misma. Así pues, se verifica que:

$$N_1 \bar{I}_1 - N_2 \bar{I}_2 = N_1 \bar{I}_0 \rightarrow \bar{I}_1 = \bar{I}_0 + \left(\frac{N_2}{N_1} \right) \bar{I}_2 \quad (15)$$

En esta expresión el efecto de la corriente secundaria I_2 está afectado de un signo negativo debido al convenio de signos adoptado para las corrientes y los flujos.

Reducción al primario

Desde un punto de vista *matemático* la reducción al primario consiste en un cambio de variable en las magnitudes del secundario que facilita el análisis de esta máquina. Las magnitudes secundarias reducidas al primario I'_2 , V'_2 , Z'_2 , R'_2 y X'_2 se obtienen mediante las relaciones (16).

$$\begin{array}{l}
 \bar{V}'_2 = m \bar{V}_2 \\
 \bar{I}'_2 = \frac{\bar{I}_2}{m} \\
 Z'_L = \frac{V'_2}{I'_2} = m^2 Z_L \\
 R'_2 = m^2 R_2 \\
 X'_2 = m^2 X_2
 \end{array} \quad (16)$$

Desde un punto de vista *físico* la reducción del secundario al primario consiste en sustituir el devanado secundario por otro equivalente de forma que el resto de la máquina no se vea afectado por este cambio. Esto significa que al sustituir el secundario real por el equivalente las magnitudes del primario, el flujo de potencia a través del transformador y el campo magnético no cambiarán y, por lo tanto, el flujo común máximo Φ_M seguirá conservando el mismo valor. Además, el secundario equivalente se elige de forma que tenga el mismo número de espiras que el primario. Así pues, se tiene que

$$N'_2 = N_1 = m \cdot N_2 \quad (17)$$

Como el número de espiras del secundario reducido al primario es idéntico al del primario y el flujo común no cambia cuando se utiliza el secundario reducido al primario, se deduce que la f.e.m. inducida sobre este secundario equivalente E'_2 es la misma que la del primario E_1 . Por lo tanto, se cumple que:

$$E'_2 = 4,44 N'_2 f \Phi_M = 4,44 N_1 f \Phi_M = E_1 \quad \rightarrow \quad \bar{E}'_2 = m \cdot \bar{E}_2 = \bar{E}_1 \quad (18)$$

Análogamente, la tensión en bornes V'_2 y las caídas de tensión en los secundarios reducido al primario y real están ligados mediante una relación similar a la (18) (véase (16)).

Para que el flujo común sea el mismo que con el secundario real, el secundario reducido al primario debe generar la misma f.m.m. que el secundario real:

$$N'_2 \cdot \bar{I}'_2 = N_2 \cdot \bar{I}_2 \quad \rightarrow \quad \bar{I}'_2 = \frac{\bar{I}_2}{N_1 / N_2} = \frac{\bar{I}_2}{m}$$

También se puede demostrar que la resistencia R'_2 , la reactancia X'_2 y la impedancia Z'_L de este secundario equivalente están relacionadas con las respectivas magnitudes del secundario real mediante las expresiones incluidas en (16).

Comparando las relaciones (3) y (16) se deduce fácilmente que:

$$V'_{2N} = V_{1N} \quad I'_{2N} = I_{1N} \quad (19)$$

Se puede comprobar que en la reducción del primario al secundario se conservan los ángulos de fase y que las potencias activa, reactiva y aparente del secundario no varían, lo que se resume en las expresiones (20):

$$\left. \begin{aligned} S_2 &= V_2 I_2 = V_2 m \frac{I_2}{m} = V_2' I_2' \\ P_2 &= V_2 I_2 \cos \varphi_2 = V_2' I_2' \cos \varphi_2 \\ Q_2 &= V_2 I_2 \sin \varphi_2 = V_2' I_2' \sin \varphi_2 \end{aligned} \right| \quad (20)$$

En la reducción del secundario al primario también se conservan los valores del flujo común Φ y de las pérdidas en la máquina. Por consiguiente, el rendimiento no cambia.

De lo anterior se deduce que el comportamiento de un transformador se puede analizar utilizando los valores reales de las magnitudes del secundario o los valores reducidos al primario. Con los dos sistemas se obtienen los mismos resultados, pero resulta más cómodo trabajar con valores reducidos al primario.

Circuito equivalente

Trabajando con las magnitudes del secundario reducidas al primario, las expresiones (10), (14) y (15) que representan el comportamiento del transformador se convierten en estas otras:

$$\left. \begin{aligned} \bar{I}_1 &= \bar{I}_0 + \bar{I}'_2 \\ \bar{I}_0 &= \bar{I}_{Fe} + \bar{I}_\mu \\ \bar{V}_1 &= \bar{E}_1 + \bar{I}_1 (R_1 + j X_1) \\ \bar{E}'_2 &= \bar{E}_1 = \bar{V}'_2 + \bar{I}'_2 (R'_2 + j X'_2) \end{aligned} \right| \quad (21)$$

El circuito equivalente de un transformador monofásico está representado en la Fig. 12. Se puede comprobar que este circuito equivalente verifica las relaciones (21) y, por lo tanto, refleja fielmente el funcionamiento del transformador.

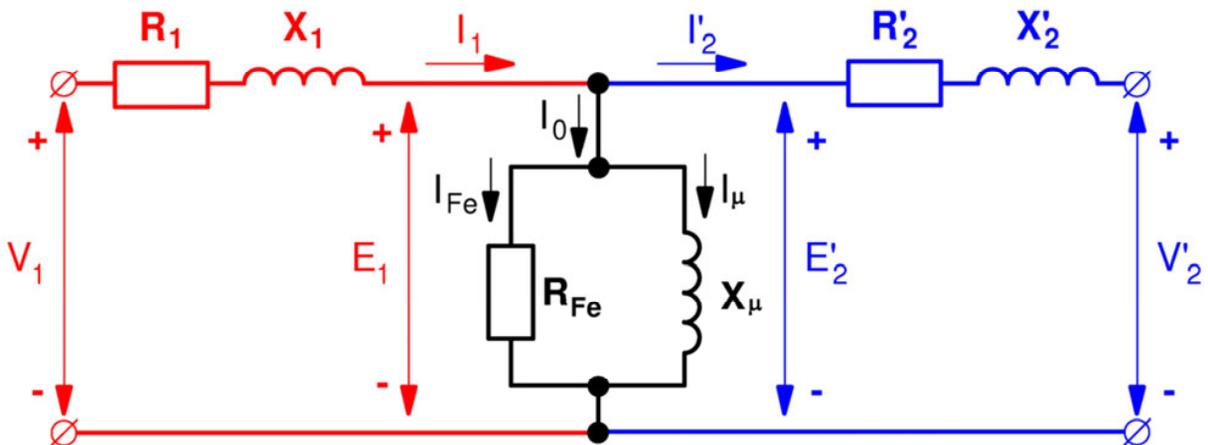


Fig. 12: Circuito equivalente de un transformador

Las ecuaciones (21) se pueden representar gráficamente mediante el **diagrama fasorial** mostrado en la Fig. 13.

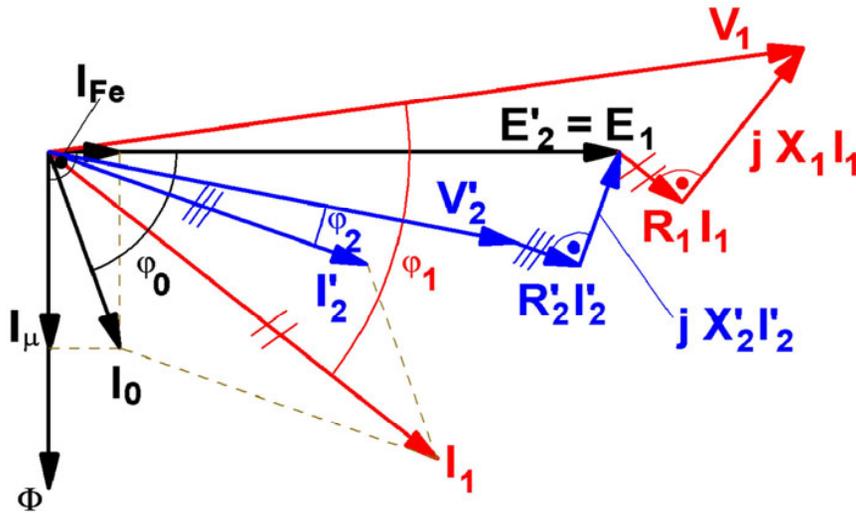


Fig. 13: Diagrama fasorial de un transformador con el secundario reducido al primario

Con el objeto de que la Fig. 13 sea más clara, en ella se han exagerado las caídas de tensión. En realidad las tensiones \bar{V}_1 y \bar{V}'_2 prácticamente están en fase.

CIRCUITO EQUIVALENTE APROXIMADO. TENSIONES RELATIVAS DE CORTOCIRCUITO

Circuito equivalente aproximado

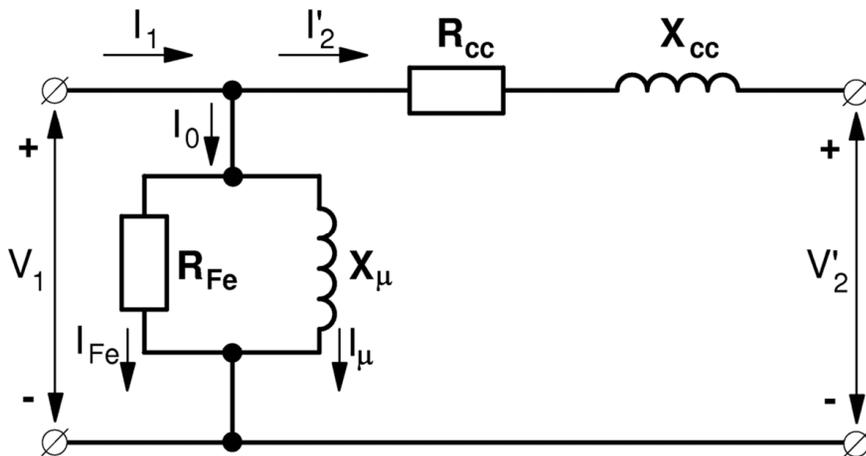


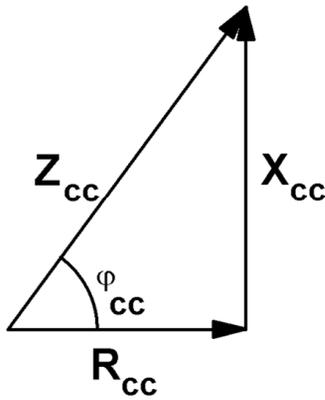
Fig. 14: Circuito equivalente aproximado de un transformador

Normalmente, para analizar el comportamiento de un transformador se utiliza el circuito equivalente aproximado de la Fig. 14 en lugar del circuito equivalente exacto de la Fig. 12. Se hace así porque es más fácil operar con el circuito aproximado y el error que se comete es poco importante, dada la pequeñez de la intensidad de vacío, I_0 , comparada con la intensidad asignada, I_{1N} , del primario del transformador (ver el anexo B). En este circuito equivalente aproximado se utilizan estos parámetros:

$$\text{Resistencia de cortocircuito: } R_{cc} = R_1 + R_2' \tag{22a}$$

$$\text{Reactancia de cortocircuito: } X_{cc} = X_1 + X_2' \tag{22b}$$

Se denomina *impedancia de cortocircuito* \bar{Z}_{cc} a:



$$\bar{Z}_{cc} = R_{cc} + j X_{cc}$$

$$Z_{cc} = \sqrt{R_{cc}^2 + X_{cc}^2} \quad (23)$$

Las relaciones entre estas tres magnitudes R_{cc} , X_{cc} y Z_{cc} se resumen en el diagrama de la Fig. 15.

Los parámetros del circuito equivalente aproximado de la Fig. 14 (R_{cc} , X_{cc} , R_{Fe} y X_{μ}) se pueden obtener de forma experimental mediante los ensayos de vacío y de cortocircuito, cuya descripción se recoge en el anexo A que se encuentra al final de este texto.

Fig. 15: Relación entre R_{cc} , X_{cc} y Z_{cc}

Tensiones relativas de cortocircuito

La **tensión relativa de cortocircuito** ε_{cc} se define así:

$$\varepsilon_{cc} = \frac{V_{1cc}}{V_{1N}} 100 = \frac{Z_{cc} \cdot I_{1N}}{V_{1N}} 100 \quad (24)$$

Donde V_{1cc} es la tensión de cortocircuito que se mide en el ensayo de cortocircuito a intensidad asignada.

De forma análoga se definen las **tensiones relativas de cortocircuito resistiva e inductiva**:

$$\varepsilon_{R_{cc}} = \frac{R_{cc} \cdot I_{1N}}{V_{1N}} 100 = \frac{P_{CuN}}{S_N} 100 \quad \varepsilon_{X_{cc}} = \frac{X_{cc} \cdot I_{1N}}{V_{1N}} 100 \quad (25)$$

En estas expresiones P_{CuN} son las pérdidas en el cobre cuando el transformador funciona con la carga asignada, la cual es prácticamente igual a la potencia P_{cc} del ensayo de cortocircuito a intensidad asignada.

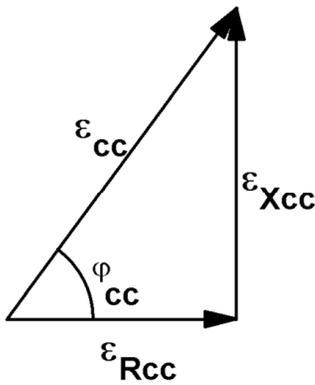
Los parámetros Z_{cc} , R_{cc} y X_{cc} son muy diferentes de unos transformadores a otros, mientras que los parámetros relativos ε_{cc} , $\varepsilon_{R_{cc}}$ y $\varepsilon_{X_{cc}}$ no varían tanto.

Como se verá más adelante, si un transformador se construye de manera que su tensión relativa de cortocircuito ε_{cc} sea pequeña se consigue que la caída de tensión en la máquina sea reducida, pero si se produce un cortocircuito las corrientes de falta son muy elevadas. Es decir, habrá que buscar un equilibrio entre los efectos favorables de disminuir ε_{cc} (menor caída de tensión) y sus efectos perjudiciales (mayores corrientes de falta). En la práctica, este parámetro suele adoptar valores comprendidos entre estos límites:

$$S_N \leq 1000 \text{ kVA} : 1\% \leq \varepsilon_{cc} \leq 6\%$$

$$S_N > 1000 \text{ kVA} : 6\% \leq \varepsilon_{cc} \leq 13\%$$

Entre las tensiones relativas de cortocircuito existen estas relaciones que quedan reflejadas en el diagrama de la Fig. 16:



$$\left. \begin{aligned} \varepsilon_{R_{cc}} &= \varepsilon_{cc} \cdot \cos \varphi_{cc} \\ \varepsilon_{X_{cc}} &= \varepsilon_{cc} \cdot \sen \varphi_{cc} \\ \varepsilon_{cc}^2 &= \varepsilon_{R_{cc}}^2 + \varepsilon_{X_{cc}}^2 \end{aligned} \right| \quad (26)$$

Nótese que los diagramas representados en las Figs. 15 y 16 son triángulos semejantes, pues el triángulo de la Fig. 16 se puede obtener del de la Fig. 15 multiplicando la longitud de todos sus lados por la misma constante:

$$\frac{V_{1N}}{I_{1N}} 100$$

Fig. 16: Relación entre $\varepsilon_{R_{cc}}$, $\varepsilon_{X_{cc}}$ y ε_{cc}

FALTA O FALLO DE CORTOCIRCUITO

Se produce una falta o fallo de cortocircuito cuando, por accidente, ocurre un cortocircuito franco en bornes del secundario del transformador estando alimentado el primario a su tensión asignada (Fig. 17).

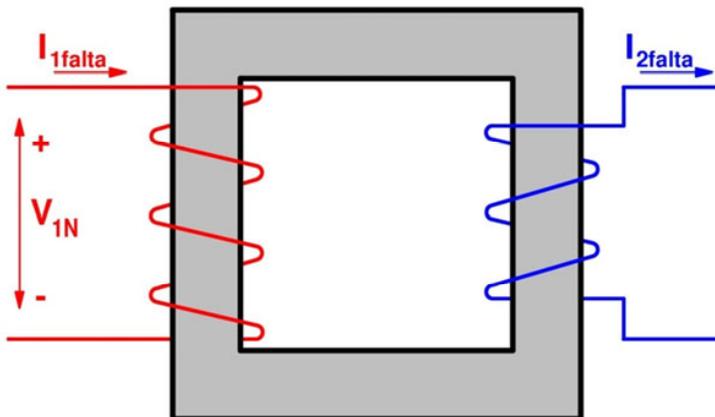


Fig. 17: Falta de cortocircuito

No se debe confundir esta falta con el ensayo de cortocircuito. La falta de cortocircuito es un accidente en el que van a circular por los devanados del transformador unas corrientes elevadas que son peligrosas para la integridad de la máquina. El ensayo de cortocircuito es un ensayo controlado que no pone en peligro a la máquina, pues el transformador es alimentado a tensiones reducidas para que no circulen por sus devanados intensidades elevadas.

Las corrientes I_{1falta} e I_{2falta} , respectivamente, que circulan por los devanados del transformador durante un cortocircuito son varias veces superiores a sus respectivas corrientes asignadas I_{1N} e I_{2N} . Ya se ha indicado anteriormente que la corriente de vacío I_0 es pequeña frente a la corriente asignada I_{1N} . Luego, frente a una corriente, I_{1falta} , mucho mayor que I_{1N} , I_0 llega a ser totalmente insignificante. Esto permite prescindir de la rama en paralelo (con R_{Fe} y X_{μ}) del circuito equivalente aproximado de la Fig. 14 y analizar este caso mediante el circuito equivalente de la Fig. 18.

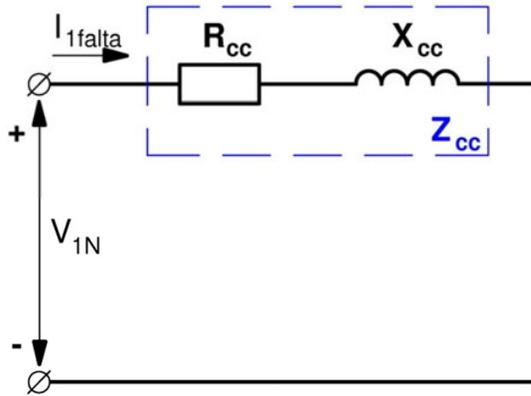


Fig. 18: Circuito equivalente durante la falta de cortocircuito

El hecho de que se pueda despreciar la corriente de vacío I_0 , hace que durante un cortocircuito la primera de las ecuaciones (21) se convierta en la (27) (téngase también en cuenta la segunda de las ecuaciones (16)).

$$I_{1falta} = I'_{2falta} = \frac{I_{2falta}}{m} \rightarrow I_{2falta} = m \cdot I_{1falta} \quad (27)$$

Aplicando la Ley de Ohm en el circuito equivalente de la Fig. 18 se deduce que:

$$I_{1falta} = \frac{V_{1N}}{Z_{cc}} \quad (28)$$

Si en la expresión (24) se despeja el valor de Z_{cc} y se introduce en la ecuación (28) se obtiene la siguiente relación:

$$I_{1falta} = I_{1N} \frac{100}{\varepsilon_{cc}} \quad (29a)$$

Teniendo en cuenta las relaciones (3), (27) y (28) se llega a:

$$I_{2falta} = I_{2N} \frac{100}{\varepsilon_{cc}} \quad (29b)$$

De las relaciones (29) se deduce lo que se ha anticipado anteriormente: “cuanto mayor es el valor de la tensión de cortocircuito ε_{cc} menores valores tienen las corrientes de cortocircuito en los devanados de un transformador”.

Dado los valores que suele adoptar el parámetro ε_{cc} se deduce que la corriente I_{1falta} alcanza valores entre estos límites:

$$\begin{aligned} S_N \leq 1000 \text{ kVA} : 17 I_{1N} &\leq I_{1falta} \leq 100 I_{1N} \\ S_N > 1000 \text{ kVA} : 7,7 I_{1N} &\leq \varepsilon_{cc} \leq 17 I_{1N} \end{aligned}$$

Las relaciones (29) proporcionan los valores eficaces de las corrientes de cortocircuito *permanente* en ambos devanados de un transformador. Realmente desde que se inicia el cortocircuito hasta que se establece el régimen permanente existe un *régimen transitorio* en el que el valor instantáneo de la corriente en un devanado puede llegar a ser hasta 2,5 veces el valor

eficaz correspondiente, I_{1falta} o I_{2falta} . El análisis de este régimen transitorio se sale de los límites de este texto.

Las elevadas corrientes durante un cortocircuito tienen varios efectos perjudiciales sobre el transformador. Uno de ellos es *térmico*; estas corrientes elevan la temperatura y deben ser interrumpidas antes de la temperatura suba tanto como para que los aislantes de la máquina queden afectados. El otro efecto es *dinámico*; la circulación de estas corrientes a través de las espiras de los devanados provoca la aparición de fuerzas entre ellas que las pueden deformar. Por esta razón, hay que dotar a los devanados y a sus soportes de la suficiente rigidez mecánica como para soportar estas fuerzas.

INTENSIDADES Y TENSIONES EN UN TRANSFORMADOR EN CARGA

Relación entre las corrientes I_1 e I_2 en un transformador en carga

Teniendo en cuenta la relación (15), la segunda ecuación de (16) y la primera de (21) se comprende que la existencia de la corriente de vacío, I_0 , provoca que entre las corrientes secundaria, I_2 , y primaria, I_1 , no se guarde exactamente la relación de transformación, m . Ahora bien, como ya se indicó al estudiar la marcha en vacío, la corriente de vacío es pequeña frente a la corriente asignada I_{1N} y, en consecuencia, la corriente I_0 se puede despreciar frente a I'_2 para cargas superiores a los $\frac{3}{4}$ de la asignada. Así pues, para estas cargas el cociente entre las corrientes I_2 e I_1 se le puede considerar igual a la relación de transformación m :

$$I_1 \geq 0,75 I_{1N} \quad \rightarrow \quad \frac{I_2}{I_1} = \frac{N_1}{N_2} = m \quad (30)$$

Caída de tensión

Mediante el circuito equivalente aproximado de la Fig. 14 y la primera de las relaciones (16) se comprende que la caída de tensión que la corriente I'_2 origina en R_{cc} y X_{cc} provoca que en carga no se guarde exactamente la relación de transformación m entre las tensiones primaria, V_1 , y secundaria, V_2 . Esto no sucede en vacío donde, como ya se indicó anteriormente, sucede que:

$$\text{Vacío: } I'_2 = 0 \quad \rightarrow \quad V'_{20} = m V_{20} = V_{1N} \quad \rightarrow \quad \frac{V_{1N}}{V_{20}} = m \quad \rightarrow \quad V_{20} = V_{2N} \quad (31)$$

Luego, un transformador en vacío funciona de manera ideal, pues las tensiones de sus devanados guardan entre sí la relación de transformación m .

Sin embargo, en carga la tensión secundaria V_2 se aparta del valor en vacío V_{20} . La diferencia entre ambas magnitudes depende de los parámetros del transformador, de la corriente secundaria I_2 y de su factor de potencia. En consecuencia, en carga un transformador se separa del comportamiento ideal, pues no va a proporcionar una tensión secundaria invariable con la carga que guarde exactamente la relación de transformación m con respecto a la tensión primaria. No obstante, los transformadores de potencia se construyen de forma que estas variaciones en la tensión secundaria sean pequeñas.

En resumen, se tiene que:

TRANSFORMADORES

$$\text{Carga: } I_2 \neq 0 \rightarrow \frac{V_1}{V_2} \neq m, \text{ aunque } \frac{V_1}{V_2} \approx m \quad (32)$$

Considérese un transformador funcionando en carga con una marcha industrial (es decir con el primario a la tensión asignada V_{1N}). Se denomina **caída de tensión relativa** o **regulación** ε_c , expresada en tanto por ciento, a esta magnitud:

$$\varepsilon_c = \frac{V_{20} - V_2}{V_{20}} 100 = \frac{V_{2N} - V_2}{V_{2N}} 100 \quad (33)$$

Teniendo en cuenta las relaciones (2) y (16), la expresión (33) queda de la siguiente manera:

$$\varepsilon_c = \frac{V'_{2N} - V'_2}{V'_{2N}} 100 = \frac{V_{1N} - V'_2}{V_{1N}} 100 \quad (34)$$

En resumen, la caída de tensión relativa se puede expresar en función tanto de las tensiones secundarias como de las tensiones secundarias reducidas al primario:

$$\boxed{\varepsilon_c = \frac{V_{2N} - V_2}{V_{2N}} 100 = \frac{V_{1N} - V'_2}{V_{1N}} 100} \quad (35)$$

Dado que en una marcha industrial las caídas de tensión en R_{cc} y X_{cc} son pequeñas frente a la f.e.m. E_1 , se puede demostrar (ver el anexo B) que se cumple la siguiente relación con suficiente exactitud:

$$\boxed{\varepsilon_c = C (\varepsilon_{R_{cc}} \cos \varphi_2 \pm \varepsilon_{X_{cc}} \sin \varphi_2)} \quad (36)$$

En la fórmula (36) se emplean los valores absolutos de $\sin \varphi_2$ y de $\cos \varphi_2$ y se usa el signo + cuando la carga tiene factor de potencia inductivo, mientras que se utiliza el signo - en cargas con factor de potencia capacitivo.

Se denomina **índice de carga** C al siguiente cociente

$$C = \frac{S}{S_N} = \frac{V_2 I_2}{V_{2N} I_{2N}} \quad (37)$$

donde se representa por S a la potencia aparente suministrada por el secundario ($S = S_2$). En la fórmula anterior hay que tener cuidado de emplear las mismas unidades para las dos potencias.

En marcha industrial la tensión secundaria V_2 no va a ser muy diferente de la tensión asignada V_{2N} . Luego, teniendo en cuenta también las expresiones (3), (16) y (30), se puede poner que:

$$\boxed{C = \frac{S}{S_N} \approx \frac{I_2}{I_{2N}} = \frac{I'_2}{I'_{2N}} = \frac{I'_2}{I_{1N}} \approx \frac{I_1}{I_{1N}}} \quad (38)$$

Para cargas de tipo inductivo o resistivo, ε_c siempre es positivo y la tensión V_2 tiene un valor eficaz inferior a V_{20} , lo que significa que se produce una caída de tensión en el secundario

cuando la máquina pasa de estar en vacío a estar en carga. Sin embargo, con cargas capacitivas puede producirse (no siempre, depende de la carga) el denominado **efecto Ferranti**. En este caso ϵ_c es negativo y la tensión secundaria en carga, V_2 , alcanza un valor eficaz superior al que tenía en vacío, V_{20} . Se produce, entonces, una subida de tensión secundaria cuando la máquina pasa de estar en vacío a estar en carga.

La expresión (36) muestra lo que ya se había adelantado antes; la caída de tensión es proporcional a la tensión relativa de cortocircuito ϵ_{cc} (cuyas componentes son ϵ_{Rcc} y ϵ_{Xcc} (Fig. 16)) e interesa que este parámetro no adopte valores excesivamente grandes.

Aunque el transformador no tenga su primario conectado exactamente a la tensión asignada, siempre que V_1 no sea muy diferente a V_{1N} se puede generalizar la expresión (36) y escribir lo siguiente:

$$V_1 \approx V_{1N} \rightarrow \frac{\frac{V_1}{m} - V_2}{V_{2N}} 100 = \frac{V_1 - V'_2}{V_{1N}} 100 = C (\epsilon_{Rcc} \cos \varphi_2 \pm \epsilon_{Xcc} \sin \varphi_2) \quad (39)$$

BALANCE DE POTENCIAS. RENDIMIENTO

Balance de potencias

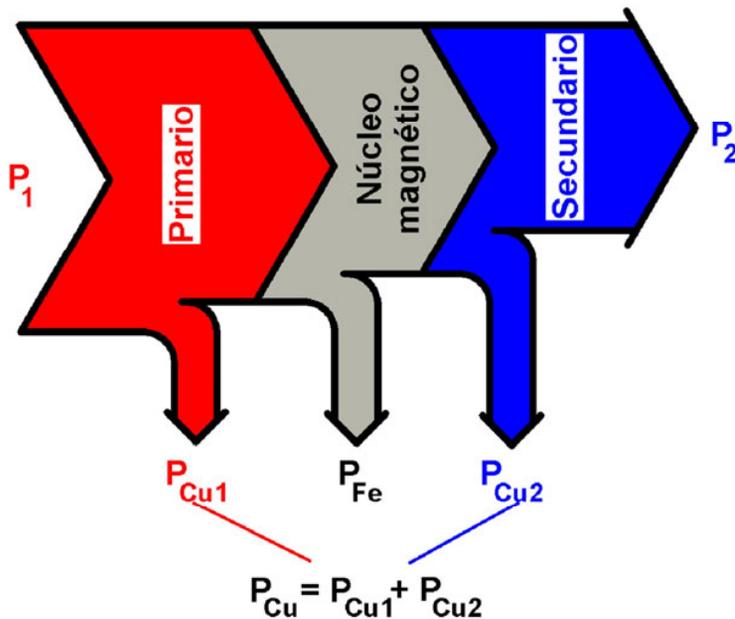


Fig. 19: Balance de potencias en un transformador

En un transformador en carga se absorbe una potencia activa P_1 por el primario y se suministra una potencia activa P_2 de menor valor por el secundario debido a que una pequeña parte de la potencia P_1 se pierde dentro del transformador. Esta potencia perdida, que se denomina **pérdidas del transformador**, se debe a diferentes causas y se acaba disipando en forma de calor. El **balance o flujo de potencias** de un transformador está representado en la Fig. 19.

Como se puede apreciar en la Fig. 19, una pequeña fracción de la potencia P_1 que entra por el primario se pierde debido al *efecto Joule* cuando la corriente I_1 circula por el devanado

primario, que presenta una resistencia R_1 . Esta potencia perdida son las **pérdidas en el cobre del primario** P_{Cu1} . La potencia restante se transmite hacia el secundario mediante el campo magnético común Φ que circula a través del núcleo magnético. Dado que el flujo Φ es alterno provoca la aparición de una pérdida de potencia en el núcleo magnético debida a las *corrientes de Foucault* y al fenómeno de la *histéresis*. Esta potencia perdida son las **pérdidas en el hierro** P_{Fe} . De la potencia que llega al devanado secundario todavía hay que restar la potencia que se pierde a causa del *efecto Joule* cuando la corriente I_2 circula por este devanado, el cual tiene una resistencia R_2 . Esta potencia perdida son las **pérdidas en el cobre del secundario** P_{Cu2} . La potencia restante es la potencia activa P_2 que se suministra por el secundario.

En lo que se sigue se va a considerar un transformador monofásico funcionando con una marcha industrial; esto es, alimentado por el primario con la frecuencia y la tensión asignadas.

Las **pérdidas en el cobre totales** P_{Cu} es la suma de las pérdidas en el cobre del primario y del secundario:

$$P_{Cu} = P_{Cu1} + P_{Cu2} = R_1 I_1^2 + R_2 I_2^2 \approx (R_1 + R_2) I_2^2 = R_{cc} I_2^2 \quad (40)$$

Las **pérdidas en el cobre asignadas o nominales** P_{CuN} es el valor de P_{Cu} cuando el transformador está funcionando con la marcha asignada. Por lo tanto:

$$P_{CuN} = R_{cc} I_{2N}^2 = R_{cc} I_{1N}^2 = \frac{\epsilon R_{cc}}{100} S_N \quad (41)$$

De las fórmulas (38), (40) y (41) se deduce que:

$$P_{Cu} = C^2 P_{CuN} \quad (42)$$

En los circuitos equivalentes exacto (Fig. 12) y aproximado (Fig. 14), la potencia de pérdidas en el hierro P_{Fe} es la que se disipa en la resistencia R_{Fe} .

Ya se ha indicado anteriormente que las pérdidas en el hierro P_{Fe} son iguales para todas las marchas industriales y, además, son iguales a la potencia de vacío P_0 (ver la relación (13)). Por lo tanto, las pérdidas en el hierro constituyen las **pérdidas fijas** P_f de un transformador:

$$\boxed{P_{Fe} = P_0 = P_f} \quad (43)$$

Sin embargo, la potencia de pérdidas en el cobre varía con la carga que tenga en cada momento el transformador (ver la ecuación (42)). Por lo tanto, las pérdidas en el cobre constituyen las **pérdidas variables** P_v de un transformador:

$$\boxed{P_{Cu} = C^2 P_{CuN} = P_v} \quad (44)$$

La potencia P_2 en el secundario verifica lo siguiente (recuérdese la ecuación (38)):

$$P_2 = V_2 I_2 \cos\varphi_2 = S \cos\varphi_2 \rightarrow \boxed{P_2 = C S_N \cos\varphi_2} \quad (45)$$

Del balance de potencias reflejado en la Fig. 19 se obtiene que:

$$P_1 = P_2 + P_{Cu} + P_{Fe} \quad (46)$$

Rendimiento de un transformador

El **rendimiento** η del transformador se define así:

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{P_2}{P_2 + P_{Cu} + P_{Fe}} \quad (47)$$

Teniendo en cuenta las fórmulas (43), (44), (45) y (47) se deduce que:

$$\boxed{\eta = \frac{C S_N \cos \varphi_2}{C S_N \cos \varphi_2 + C^2 P_{CuN} + P_{Fe}}} \quad (48)$$

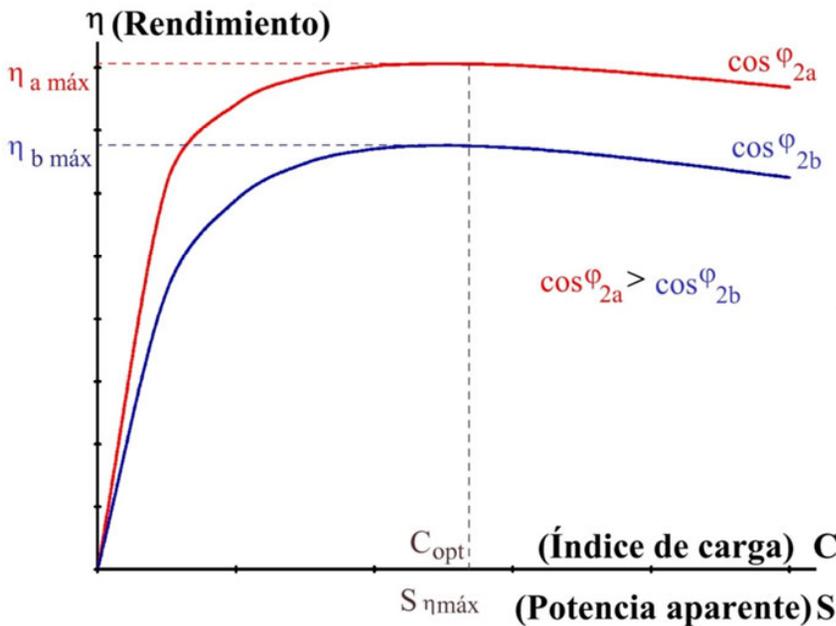


Fig. 20: Curvas del rendimiento en función de la potencia y el índice de carga para dos factores de potencia distintos

En la Fig. 20 se muestra la variación del rendimiento con la carga si su factor de potencia ($\cos \varphi_2$) permanece constante. Estas curvas se obtienen a partir de la relación (48) y en ellas la carga se indica, bien como índice de carga C , o bien como la potencia aparente S suministrada por el secundario; pues ambas magnitudes son proporcionales al estar relacionadas mediante la expresión (38). Así pues, cada una de las curvas que se representan en la Fig. 20 corresponde a un factor de potencia constante.

En la Fig. 20 se observa que, sea cual sea el valor del factor de potencia, existe un único valor de carga para la cual el rendimiento alcanza su valor máximo. Esta carga es la que corresponde al índice de carga C_{opt} o a la potencia aparente $S_{\eta \text{ máx}}$:

$$S_{\eta \text{ máx}} = C_{\text{opt}} \cdot S_N \quad (49)$$

Sin embargo, el valor del **rendimiento máximo** η_{\max} es diferente de un factor de potencia a otro (Fig. 27). El rendimiento máximo es mayor cuanto más alto es el factor de potencia. Por lo tanto, el mayor de los rendimientos máximos se produce cuando el factor de potencia vale 1.

Se puede demostrar que la carga para la cual el rendimiento es máximo es aquella en la que las pérdidas fijas y variables son iguales (**condición de rendimiento máximo**). Luego:

$$\eta_{\max} \rightarrow P_f = P_v \rightarrow P_{Fe} = P_{Cu} \quad (50)$$

$$P_{Fe} = P_{Cu} = C_{\text{opt}}^2 P_{CuN} \rightarrow \boxed{C_{\text{opt}} = \sqrt{\frac{P_{Fe}}{P_{CuN}}}} \quad (51)$$

El rendimiento máximo se obtendrá mediante la relación (48) si en ella se utiliza el valor C_{opt} . De (48), (49) y (50) se deduce que

$$\eta_{\max} = \frac{S_{\eta_{\max}} \cos \varphi_2}{S_{\eta_{\max}} \cos \varphi_2 + 2P_{Fe}} \quad (52)$$

En las fórmulas (47), (48) y (52) hay que tener cuidado de emplear las mismas unidades para todas las potencias.

Consecuencias prácticas

- Se debe evitar el funcionamiento de un transformador con cargas pequeñas porque el rendimiento sería pequeño.
- Se debe procurar que un transformador funcione con un índice de carga próximo al óptimo (C_{opt}) para obtener un rendimiento mejor.

Si el transformador estuviera funcionando siempre con su carga asignada interesaría que C_{opt} fuera igual a la unidad y así funcionaría con el rendimiento máximo. Pero lo habitual es que la carga sea variable. Por esta razón, los transformadores grandes se diseñan de forma que el valor de C_{opt} esté entre 0,5 y 0,7 y los transformadores de distribución de pequeña potencia se diseñan de forma que C_{opt} tenga un valor entre 0,3 y 0,5.

- Se debe elegir un transformador cuya potencia asignada no sea demasiado elevada para el servicio a la que se destina, ya que trabajaría con carga reducida y su rendimiento sería bajo.
- Si se compara el comportamiento de un transformador para dos factores de potencia diferentes, $\cos \varphi_{2a}$ mayor que $\cos \varphi_{2b}$ ($\cos \varphi_{2a} > \cos \varphi_{2b}$), puede suceder que el rendimiento máximo para el factor de potencia $\cos \varphi_{2b}$ sea inferior a un rendimiento diferente del máximo para $\cos \varphi_{2a}$ (ver la Fig. 20).

CORRIENTE DE VACÍO DE UN TRANSFORMADOR MONOFÁSICO

Cuando un transformador está conectado por el primario a la tensión nominal y funciona en vacío, la corriente de vacío es tan pequeña que se pueden despreciar las caídas de tensión en el primario y aceptar que:

$$I_0 \ll \rightarrow \bar{V}_1 = \bar{E}_1$$

lo que, trabajando con valores instantáneos, significa que:

$$v_1 = e_1 = N_1 \frac{d\Phi}{dt}$$

Es decir, en vacío el flujo magnético se obtiene integrando la tensión del primario. Por lo tanto, si la tensión de alimentación varía sinusoidalmente con el tiempo se obtiene que el flujo también es una función sinusoidal del tiempo y se encuentra desfasado 90° con respecto a la tensión. En la Fig. 21 se muestran las ondas de tensión y de flujo durante la marcha en vacío.

Normalmente los transformadores se diseñan para que a la tensión nominal el núcleo magnético se encuentre en la zona del codo de la curva de magnetización, como se puede apreciar en la Fig. 22 donde se indican los valores máximos del flujo Φ_m y de la corriente I_{0m} del transformador en vacío.

Dado que la relación entre el flujo y la corriente de vacío está dada por la curva de magnetización o de vacío (Fig. 22), la cual no es una relación lineal; se obtiene que si el flujo en régimen permanente es una función sinusoidal (ver la Fig. 21) la corriente de vacío no lo es y tiene la forma representada en la Fig. 23.

Realmente la onda de la corriente de vacío está todavía algo más deformada que lo que se representa en la Fig. 23 debido a la histéresis magnética. Este fenómeno hace que la relación entre el flujo y la corriente de vacío sea aún menos lineal que lo que indica la curva de vacío (Fig. 22).

En consecuencia, la corriente de vacío de un transformador monofásico no es una onda sinusoidal y, además, su descomposición en serie de Fourier da lugar a un tercer armónico elevado.

Usualmente, al analizar un transformador monofásico –por ejemplo, cuando se emplea su circuito equivalente (Figs. 13 y 14)– lo que se hace es trabajar con una *corriente de vacío equivalente sinusoidal*. Esta es una corriente sinusoidal cuyo valor eficaz es el mismo que el de la corriente de vacío real y que está desfasada respecto a la tensión primaria el ángulo adecuado para que origine las mismas pérdidas en el hierro que la corriente de vacío real.

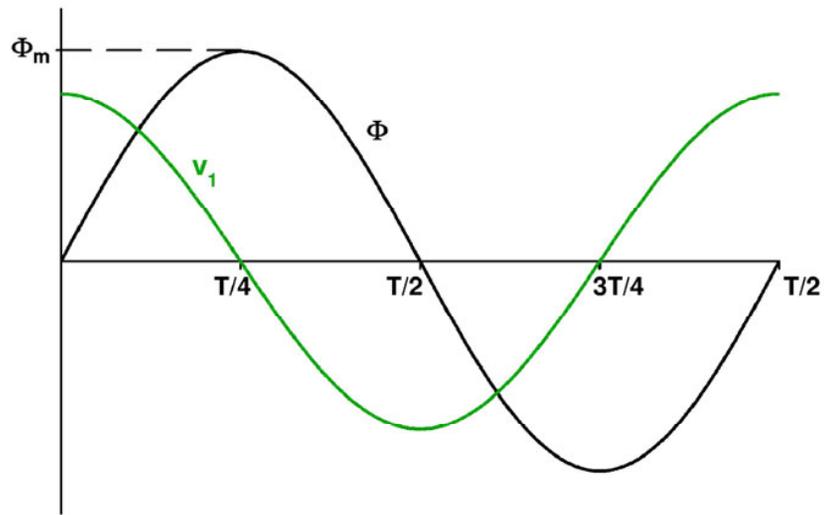


Fig. 21: Tensión y flujo durante la marcha de vacío

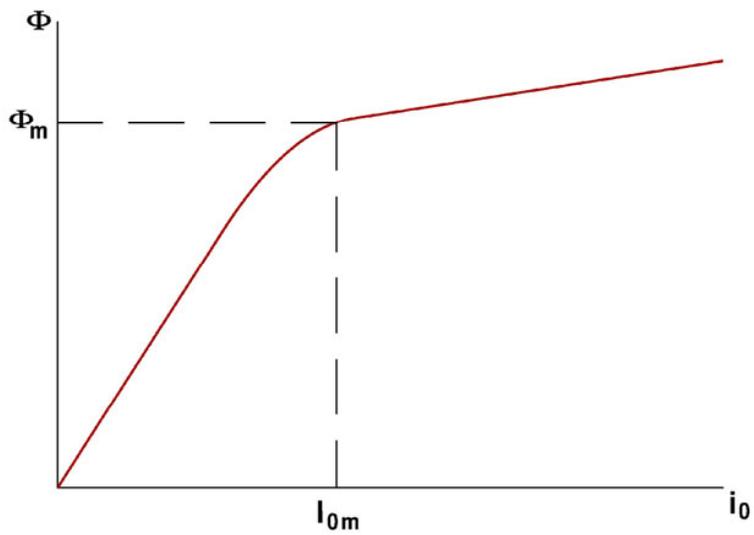


Fig. 22: Característica de vacío de un transformador

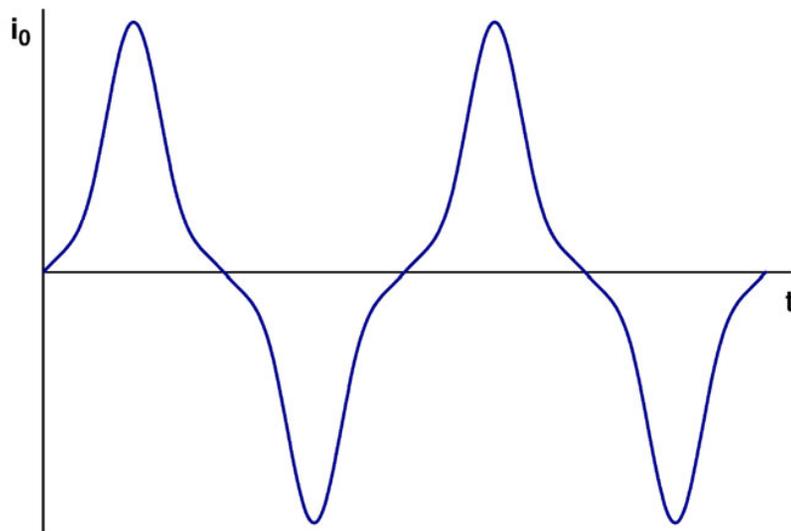


Fig. 23: Corriente de vacío de un transformador monofásico

AUTOTRANSFORMADORES

Un autotransformador es un transformador especial que para cada fase tiene un único devanado que actúa a la vez de primario y de secundario (Fig. 24).

Al tener un solo devanado para el primario y el secundario un autotransformador es más barato que un transformador convencional y, además, tiene menos pérdidas; esto es, mejor rendimiento, y una caída de tensión menor.

Un autotransformador presenta el inconveniente, frente a un transformador normal, de que en el caso de producirse un cortocircuito aparecen corrientes de falta muy elevadas. Esto es debido al pequeño valor de su tensión relativa de cortocircuito ϵ_{cc} .

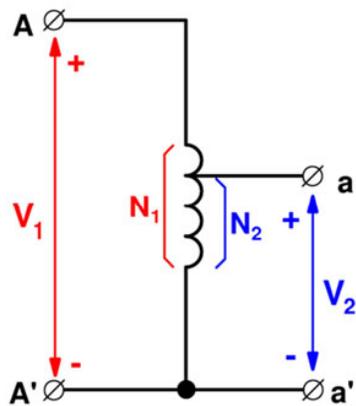


Fig. 24: Autotransformador monofásico

Sin embargo, el principal inconveniente de un autotransformador es que no existe aislamiento entre los circuitos primario y secundario de cada fase. En un transformador normal los dos devanados de una fase están aislados entre sí. Son circuitos que están ligados a través de un campo magnético, pero eléctricamente están separados. Sin embargo, en un autotransformador este aislamiento no existe; pues se trata del mismo devanado que actúa a la vez como primario y como secundario.

Así, tomando un caso extremo, si el autotransformador de la Fig. 24 tiene una relación de transformación de 10000/100 V sucede que entre los terminales A y A' hay 10000 V y entre los terminales a y a' hay 100 V, siendo A' = a' el borne común. Si el terminal A, por accidente, queda conectado a tierra sucede que, como entre A y A' hay 10000 V, el punto A' está a una tensión de 10000 V con respecto a tierra. Esto significa que el lado de B.T. entre a y a' hay 100 V, pero a' se encuentra a 10000 V con respecto a tierra. Es decir, en un circuito de B.T. pueden aparecer tensiones muy elevadas con respecto a tierra, lo cual resulta muy peligroso.

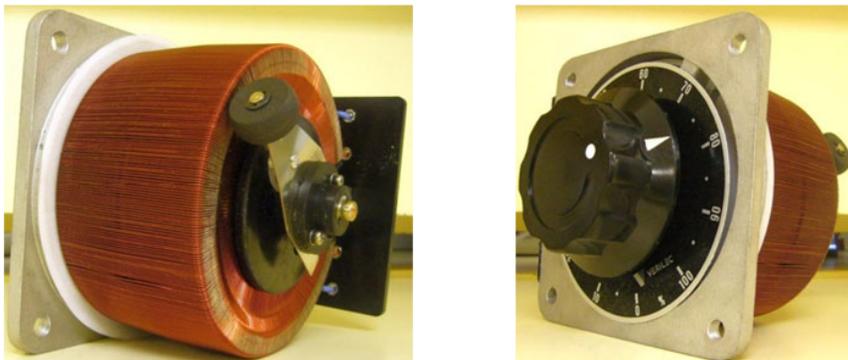


Fig. 25: Variac monofásico



Fig. 26: Variac trifásico

Para reducir este riesgo, el punto común ($A' = a'$) debe conectarse a tierra y las tensiones del primario y del secundario no deben ser muy diferentes entre sí. Sólo se admite que las tensiones de los circuitos primario y secundario sean muy diferentes si en ambos circuitos no hay ningún punto con una tensión superior a 250 V con respecto a tierra.

Hay autotransformadores en los que el terminal a no es fijo sino que se mueve mediante un cursor. Esto permite variar la relación de transformación del autotransformador y, por lo tanto, obtener una tensión secundaria variable a voluntad. Este tipo de autotransformadores se denomina **variac** y en ellos el núcleo magnético de cada fase suele tener forma de toro alrededor del cual se bobina el arrollamiento que hace de primario y de secundario a la vez (Figs. 36 y 37).

TRANSFORMADORES DE MEDIDA Y DE PROTECCIÓN

La medida directa de tensiones elevadas exigiría disponer de un voltímetro con unos aislamientos enormes y, además, resultaría peligroso que alguien se acercara a él para realizar la lectura de sus indicaciones.

Por esta razón, para la medida de tensiones alternas elevadas se utilizan **transformadores de tensión** conectados según se indica en la Fig. 27.

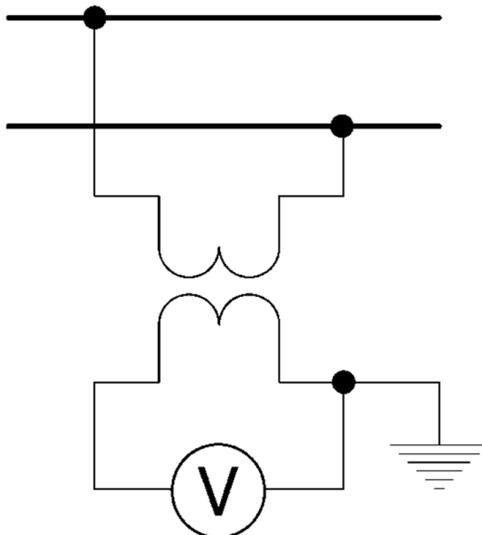


Fig. 27: Transformador de tensión

TRANSFORMADORES

Así, si se desea medir una tensión alterna de 10000 V se puede utilizar un voltímetro de 110 V y un transformador de tensión de relación de transformación de 10000/110 V (es decir, cuando el circuito está a 10000 V, el transformador de tensión suministra 110 V al voltímetro). Las lecturas que se realicen con este voltímetro habrá que multiplicarlas por 10000/110 para obtener el valor de la tensión medida.

La tensión asignada secundaria de los transformadores de tensión (la que se suministra al voltímetro) suele ser de 110 V.

Análogamente, para la medida de corrientes alternas elevadas o de corrientes alternas en circuitos de alta tensión se utilizan **transformadores de intensidad** conectados como se indica en la Fig. 28.

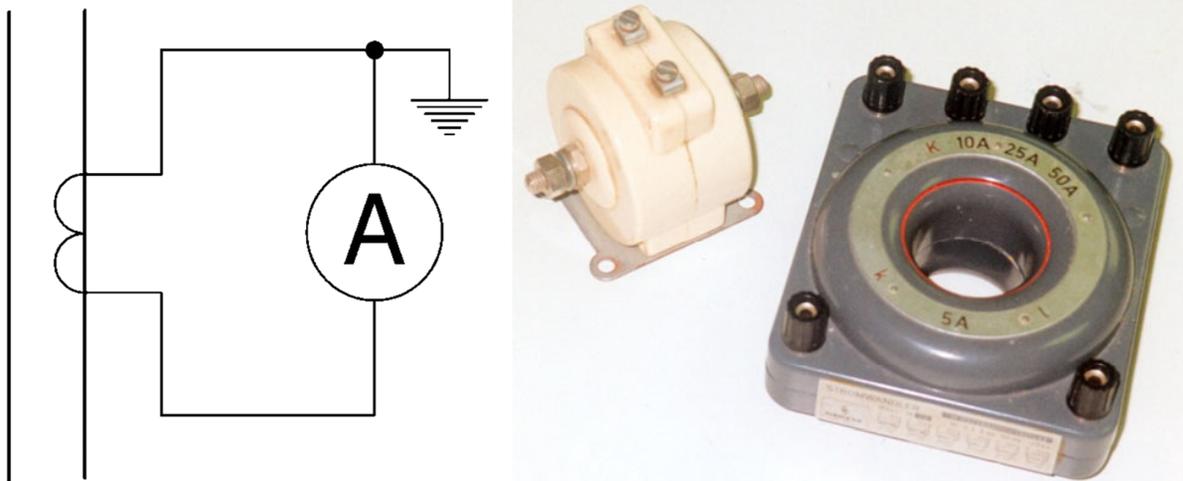


Fig. 28: Transformador de intensidad

Así, si se desea medir una intensidad de 500 A se pueden utilizar un amperímetro de 5 A y un transformador de intensidad de relación de transformación 500/5 A (es decir cuando circulen 500 A por el circuito, el transformador de intensidad suministra 5 A al amperímetro). Las lecturas que se realicen con este amperímetro habrá que multiplicarlas por 500/5 para obtener la intensidad medida.

La intensidad secundaria de los transformadores de intensidad (la que suministran al amperímetro) suele ser 5 ó 1 A.

No es conveniente utilizar los transformadores de medida (tanto de tensión, como de intensidad) para medir magnitudes cuyos valores difieran mucho de los valores asignados del primario de estos transformadores, pues se pierde precisión en la medida.

Los transformadores de medida permiten aislar galvánicamente el circuito que se está midiendo de los aparatos de medida. De esta forma, los aparatos de medida se encuentran sometidos a una tensión respecto a tierra menos peligrosa y, por consiguiente, más segura para las personas que se acerquen a leer sus indicaciones. Se recomienda poner a tierra uno de los terminales del secundario del transformador de medida.

Con los transformadores de intensidad hay que tener cuidado de no dejar nunca el secundario abierto (es decir, desconectado), pues puede dar lugar a sobretensiones peligrosas.

Los **transformadores de protección** (de tensión y de corriente) son similares a los de medida, pero su secundario no alimenta aparatos de medida sino aparatos de protección, tales como: relés magnetotérmicos, relés diferenciales, etc.

Los transformadores de medida cometen un error menor que los de protección, siempre que estén midiendo magnitudes (corrientes en los transformadores de intensidad y tensiones en los transformadores de tensión) cuyo valor no difiera excesivamente del asignado. El error de medida en los transformadores de protección es mayor que en los transformadores de medida funcionando con la magnitud asignada, pero se conserva dentro de unos valores razonables para magnitudes cuyo valor es muy diferente del asignado. Así, por ejemplo, un transformador de intensidad de protección es capaz de detectar cortocircuitos y sobrecargas en los que las corrientes son varias veces superiores a la asignada; sin embargo, un transformador de intensidad de medida limita el valor máximo de corriente que suministra por su secundario cuando la corriente primaria empieza a ser grande para así proteger al aparato de medida que esté conectado a su secundario.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] CHAPMAN. 2005. *Máquinas eléctricas*. Madrid: McGraw-Hill Interamericana.
- [2] CORRALES MARTIN. 1982. *Cálculo Industrial de máquinas eléctricas (2 tomos)*. Barcelona: Marcombo.
- [3] EQUIPO EPS ZARAGOZA. 1981. *Tecnología de Electricidad 4 instalaciones y líneas*. Barcelona: EDEBE.
- [4] FITZGERALD, KINGSLEY Y UMANS. 2004. *Máquinas eléctricas*. Madrid: McGraw-Hill Interamericana.
- [5] FRAILE MORA, J. 2008. *Máquinas eléctricas*. Madrid: McGraw-Hill Interamericana.
- [6] FRAILE MORA y GARCÍA GUTIÉRREZ. *Prácticas de Electrotecnia*. Madrid: Departamento de Publicaciones de la E.T.S.I.C.C.P. de Madrid.
- [7] GURRUTXAGA, J. A. 1985. *El fenómeno electromagnético. Tomo IV. Las máquinas eléctricas II*. Santander: Dpto. de publicaciones de la E.T.S.I.C.C.P. de Santander.
- [8] IVANOV-SMOLENSKI. 1984. *Máquinas eléctricas. Tomo 2*. Moscú: Editorial Mir.
- [9] KOSTENKO y PIOTROVSKI. 1979. *Máquinas eléctricas. Tomo II*. Moscú: Editorial Mir.
- [10] LANGSDORF. 1977. *Teoría de las máquinas de c.a.* Méjico: McGraw-Hill.
- [11] AENOR. 1998. *Norma UNE-EN 60076-1: Transformadores de potencia. Parte 1: Generalidades*. Madrid. AENOR.
- [12] RAS OLIVA. 1998. *Transformadores de potencia, de medida y protección*. Barcelona: Marcombo.
- [13] SANZ FEITO. 2002. *Máquinas eléctricas*. Madrid: Pearson Educación.
- [14] SUÁREZ CREO, J. M. Y MIRANDA BLANCO, B. N. 2006. *Máquinas eléctricas. Funcionamiento en régimen permanente*. Santiago de Compostela. Tórculo Edicions, S.L.

ANEXO A: ENSAYOS DE TRANSFORMADORES MONOFÁSICOS

ENSAYO DE VACÍO

Este ensayo consiste en alimentar al transformador a la tensión asignada por uno de sus devanados, dejando el otro en circuito abierto, y medir la tensión que aparece en ambos devanados y la corriente y la potencia en el devanado por donde se alimenta a la máquina. De las medidas realizadas en este ensayo se pueden deducir la relación de transformación m y los parámetros R_{Fe} y X_{μ} del circuito equivalente del transformador.

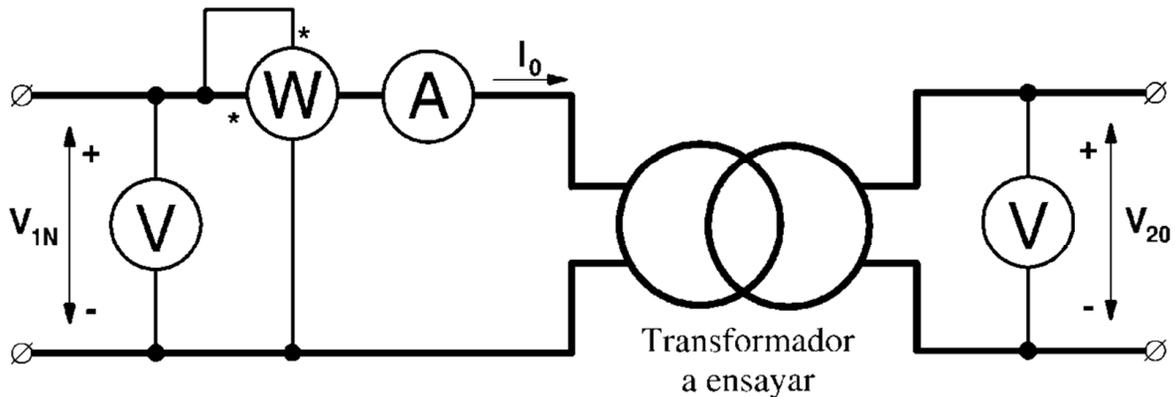


Fig. A1: Circuito para el ensayo de vacío

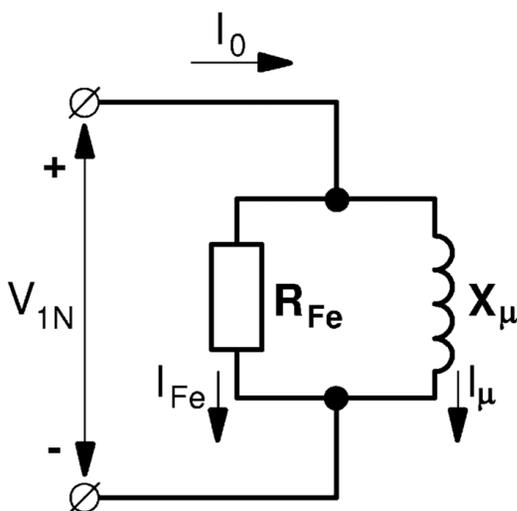


Fig. A2: Circuito equivalente durante el ensayo de vacío

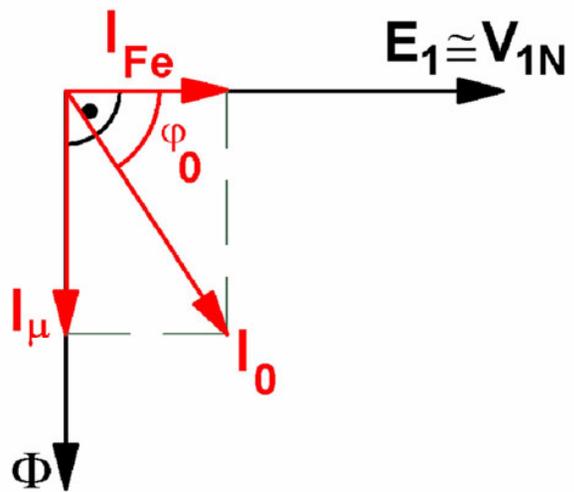


Fig. A3: Diagrama fasorial durante el ensayo de vacío

En la Fig. A1 se muestra el circuito que permite realizar el ensayo de vacío de un transformador monofásico cuando se lo alimenta por el primario.

Es evidente que si el ensayo se realiza alimentando al transformador por el primario (Fig. A1), la máquina se encuentra en el estado de marcha en vacío. Por lo tanto, las magnitudes medidas durante este ensayo serán las siguientes:

V_{1N} I_0 P_0 V_{20}

En consecuencia, la expresión (12) indica que mediante este ensayo se puede determinar la *relación de transformación* m de la máquina mediante este cociente:

$$\boxed{m = \frac{V_{1N}}{V_{20}}} \quad (A1)$$

Durante la marcha en vacío el circuito equivalente aproximado del transformador (Fig. 14) se reduce al representado en la Fig. A2, pues la corriente en el secundario I_2 es nula. En la Fig. A3 se ha repetido el diagrama fasorial del transformador en vacío.

El factor de potencia, $\cos \varphi_0$, durante la marcha en vacío se puede obtener así:

$$P_0 = V_{1N} I_0 \cos \varphi_0 \quad \rightarrow \quad \cos \varphi_0 = \frac{P_0}{V_{1N} I_0} \quad (A2)$$

Del diagrama fasorial de la Fig. A3 se deduce que:

$$I_{Fe} = I_0 \cos \varphi_0 \quad (A3a)$$

$$I_{\mu} = I_0 \sin \varphi_0 \quad (A3b)$$

Finalmente, aplicando la Ley de Ohm en el circuito equivalente de la Fig. A2 se obtienen estas expresiones para calcular los parámetros de la rama en paralelo del circuito equivalente:

$$\boxed{R_{Fe} = \frac{V_{1N}}{I_{Fe}}} \quad (A4a)$$

$$\boxed{X_{\mu} = \frac{V_{1N}}{I_{\mu}}} \quad (A4b)$$

En el caso de que el ensayo se realice alimentando al transformador por el secundario y dejando abierto el bobinado primario, las magnitudes que se medirán serán

$$V_{20} \quad I_{20} \quad P_0 \quad V_{1N}$$

La potencia seguirá siendo la misma (e igual a las pérdidas en el hierro del transformador) que cuando se lo ensaya por el primario, pero la corriente es distinta. Se demuestra que

$$m = \frac{I_{20}}{I_0} \quad \rightarrow \quad I_0 = \frac{I_{20}}{m} \quad (A5)$$

Luego, si el ensayo se realiza alimentando a la máquina por el secundario, se calculará mediante la fórmula (A5) la corriente I_0 que se hubiera obtenido de realizar el ensayo por el primario y, de esta manera, se podrán seguir empleando las relaciones (A2) a (A4).

ENSAYO DE CORTOCIRCUITO

Este ensayo consiste en cortocircuitar uno de los devanados del transformador y alimentarlo por el otro con una tensión reducida de forma que por él circule su corriente asignada. En este ensayo se miden la tensión, la corriente y la potencia en el devanado por donde se alimenta la máquina. De las medidas realizadas en este ensayo se pueden obtener los parámetros, R_{cc} y X_{cc} , de la rama en serie del circuito equivalente aproximado del transformador (Fig. 14).

En la Fig. A4 se muestra el circuito que permite realizar el ensayo de cortocircuito de un transformador monofásico cuando se lo alimenta por el primario.

En este ensayo el transformador se debe alimentar mediante una fuente de tensión alterna variable. Habrá que ir variando la tensión suministrada por esta fuente hasta conseguir que la corriente alcance su valor asignado. Es conveniente dejar al transformador funcionando de esta manera un cierto tiempo antes de realizar las medidas. De esta forma la máquina alcanza su temperatura de funcionamiento y las medidas no se realizan con la máquina en frío. Hay que tener en cuenta que la resistencia R_{cc} varía con la temperatura y hay que medirla a la temperatura a la que va a funcionar normalmente el transformador.

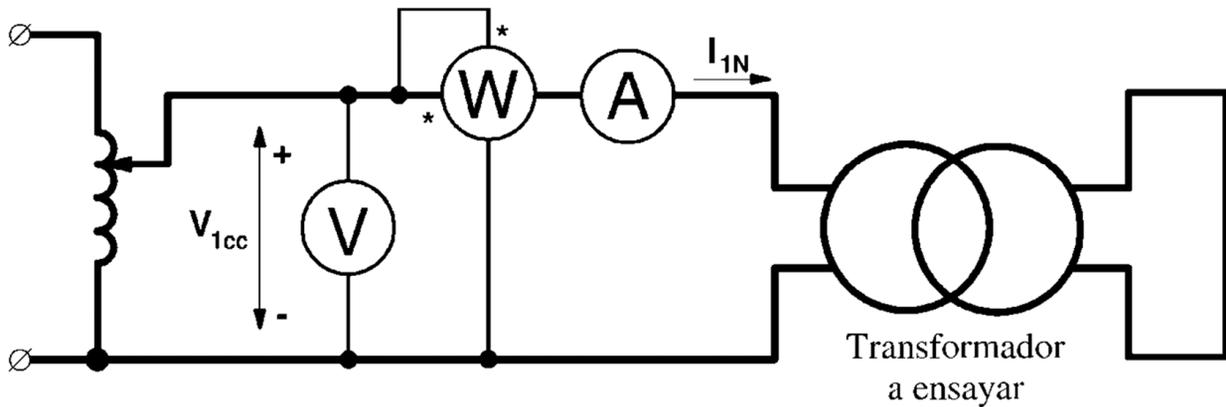


Fig. A4: Circuito para el ensayo de cortocircuito

Las magnitudes medidas durante este ensayo serán las siguientes:

$$V_{1cc} \qquad I_{1N} \qquad P_{cc}$$

En el ensayo de cortocircuito la tensión del primario es pequeña (V_{1cc} raramente supera el 15% de la tensión asignada V_{1N}) por lo que la corriente de vacío es mucho más pequeña que cuando el transformador está conectado a su tensión asignada, la cual ya era de por sí bastante pequeña. Esto quiere decir que durante este ensayo se puede despreciar totalmente la corriente de vacío con lo que el circuito equivalente aproximado (Fig. 14) se reduce al representado en la Fig. A5. En la Fig. A6 se ha repetido el triángulo de impedancias que se obtuvo anteriormente en la Fig. 15.

El hecho de que ahora la corriente de vacío se pueda despreciar significa que las corrientes secundaria y primaria guardan exactamente una proporción igual a la relación de transformación m . Como por el primario circula la corriente asignada, I_{1N} , esto conlleva (véase la relación (3)) el que también por el secundario circula su corriente asignada, I_{2N} .

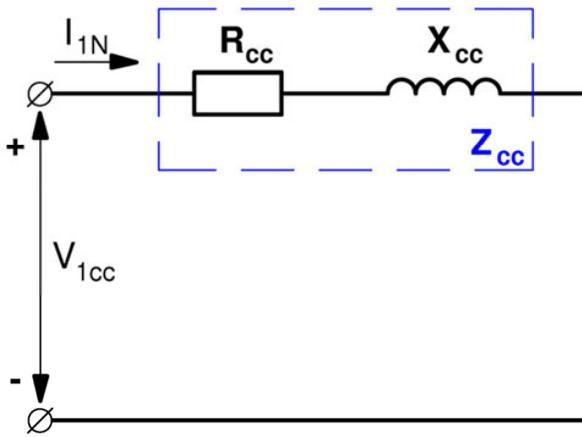


Fig. A5: Circuito equivalente durante el ensayo de cortocircuito

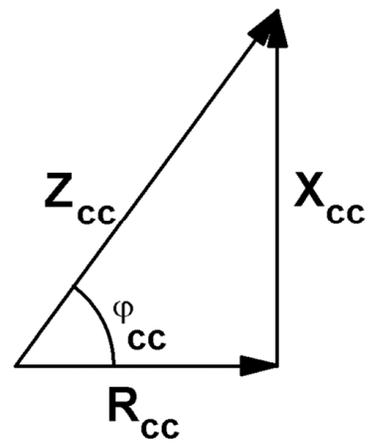


Fig. A6: Triángulo de impedancias de cortocircuito

Dada la pequeñez de la tensión primaria y de la corriente de vacío, durante el ensayo de cortocircuito se pueden despreciar totalmente las pérdidas en el hierro P_{Fe} . Como, además, la potencia P_2 es nula (por ser nula la tensión en el secundario V_2), resulta que la potencia medida en este ensayo es igual a las pérdidas en el cobre totales cuando circulan las corrientes asignadas por ambos devanados; es decir, las pérdidas en el cobre asignadas P_{CuN} :

$$P_{cc} = P_{CuN} \quad (A6)$$

El factor de potencia, $\cos \varphi_{cc}$, durante este ensayo se puede obtener así:

$$P_{cc} = V_{1cc} I_{1N} \cos \varphi_{cc} \quad \rightarrow \quad \cos \varphi_{cc} = \frac{P_{cc}}{V_{1cc} I_{1N}} \quad (A7)$$

Aplicando la Ley de Ohm en el circuito equivalente de la Fig. A5 se deduce que:

$$Z_{cc} = \frac{V_{1cc}}{I_{1N}} \quad (A8)$$

Finalmente, del triángulo de impedancias de la Fig. A6 se obtienen estas expresiones para calcular los parámetros de la rama en serie del circuito equivalente:

$$R_{cc} = Z_{cc} \cos \varphi_{cc} \quad (A9a)$$

$$X_{cc} = Z_{cc} \sin \varphi_{cc} \quad (A9b)$$

Las tensiones relativas de cortocircuito (ϵ_{cc} , ϵ_{Rcc} y ϵ_{Xcc}) se pueden determinar a partir de las magnitudes (V_{1cc} , I_{1N} y P_{cc}) medidas en el ensayo de cortocircuito a intensidad asignada mediante las relaciones (A10a), (A10b) y (A10c), las cuáles han sido deducidas a partir del triángulo de impedancias de la Fig. 16 (que se reproduce seguidamente en la Fig. A7) y de las expresiones (24), (25) y (26):

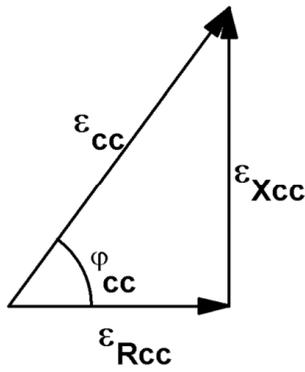


Fig. A7: Relación entre ϵ_{Rcc} , ϵ_{Xcc} y ϵ_{cc}

$$\epsilon_{cc} = \frac{V_{1cc}}{V_{1N}} 100 \quad (A10a)$$

$$\epsilon_{R_{cc}} = \frac{P_{cc}}{S_N} 100 \quad (A10b)$$

$$\epsilon_{cc}^2 = \epsilon_{R_{cc}}^2 + \epsilon_{X_{cc}}^2 \quad (A10c)$$

En el caso de que el ensayo se realice alimentando al transformador por el secundario con su intensidad asignada y dejando cortocircuitado el devanado primario, las magnitudes que se medirán serán

V_{2cc}

I_{2N}

P_{cc}

La potencia seguirá siendo la misma que cuando se lo ensaya por el primario, pero la tensión y la corriente son distintas. Se demuestra que

$$m = \frac{V_{1cc}}{V_{2cc}} = \frac{I_{2N}}{I_{1N}} \rightarrow V_{1cc} = m V_{2cc} ; I_{1N} = \frac{I_{2N}}{m} \quad (A11)$$

Luego, si el ensayo se realiza alimentando a la máquina por el secundario, se calcularán mediante las relaciones (A11) la tensión V_{1cc} y la corriente I_{1N} que se hubieran obtenido de realizar el ensayo por el primario y, de esta forma, se podrán seguir empleando las relaciones (A7) a (10).

Hay ocasiones en las que el ensayo de cortocircuito no se realiza exactamente a la intensidad asignada. En este caso, si el ensayo se realiza alimentando a la máquina por el primario, las magnitudes que se miden son:

V_{1corto}

I_{1corto}

P_{corto}

A partir de estas magnitudes se pueden calcular las que se hubieran obtenido de haber realizado el ensayo a la intensidad asignada, I_{1N} , mediante estas expresiones:

$$V_{1cc} = V_{1corto} \left(\frac{I_{1N}}{I_{1corto}} \right) \quad P_{cc} = P_{corto} \left(\frac{I_{1N}}{I_{1corto}} \right)^2 \quad (A12)$$

Calculando V_{1cc} y P_{cc} mediante las relaciones (A12) y con la corriente asignada del transformador, I_{1N} , se pueden seguir empleando las relaciones (A7) a (A10) para calcular R_{cc} , X_{cc} , ϵ_{cc} , $\epsilon_{R_{cc}}$ y $\epsilon_{X_{cc}}$.

En el caso de que el ensayo se realice alimentando al transformador por el secundario con una intensidad distinta a la asignada, I_{1N} , y dejando cortocircuitado el devanado primario, las magnitudes que se medirán serán

V_{2corto}

I_{2corto}

P_{corto}

Ahora la potencia seguirá siendo la misma que cuando se lo ensaya por el primario, pero la tensión y la corriente son distintas. Al igual que con las relaciones (A11), se demuestra que

$$m = \frac{V_{1\text{corto}}}{V_{2\text{corto}}} = \frac{I_{2\text{corto}}}{I_{1\text{corto}}} \quad \rightarrow \quad V_{1\text{corto}} = m V_{2\text{corto}} ; \quad I_{1\text{corto}} = \frac{I_{2\text{corto}}}{m} \quad (\text{A13})$$

Luego, si el ensayo se realiza alimentando a la máquina por el secundario con una corriente distinta a la asignada, primero se calcularán -mediante las relaciones (A13)- la tensión $V_{1\text{corto}}$ y la corriente $I_{1\text{corto}}$ que se hubieran obtenido de efectuar el ensayo por el primario y, a continuación -mediante las relaciones (A12)- se obtendrán los valores $V_{1\text{cc}}$ y P_{cc} correspondientes al ensayo de cortocircuito realizado por el primario a la intensidad asignada, I_{1N} . De esta manera, se podrán seguir empleando las relaciones (A7) a (A10) para calcular R_{cc} , X_{cc} , ε_{cc} , $\varepsilon_{R\text{cc}}$ y $\varepsilon_{X\text{cc}}$.

No se debe confundir el ensayo de cortocircuito que se ha descrito en este apartado con el *fallo o falta de cortocircuito*. Este es un accidente que se produce cuando el transformador tiene su primario a la tensión asignada y, de manera fortuita, su secundario queda cortocircuitado. La tensión ahora es mucho mayor que durante el ensayo y por los devanados de la máquina circularán unas corrientes mucho mayores que las asignadas, las cuales pueden resultar peligrosas para el transformador.

ANEXO B: DIAGRAMA DE KAPP. CAÍDA DE TENSIÓN

DIAGRAMA Y TRIÁNGULO DE KAPP

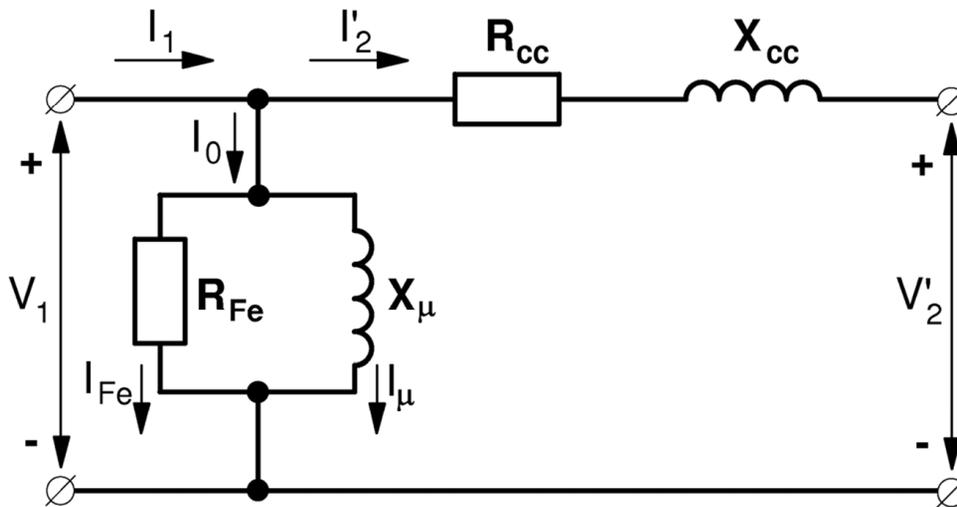


Fig. B1: Circuito equivalente aproximado de un transformador

En la Fig. B1 se vuelve a mostrar el circuito equivalente aproximado de un transformador con el secundario reducido al primario. Dada la pequeñez de la corriente de vacío I_0 de un transformador frente a su corriente asignada I_{1N} , el error cometido por usar este circuito aproximado en vez del exacto es pequeño y proporciona resultados suficientemente precisos.

Usando el circuito equivalente aproximado de un transformador de la Fig. B1 se obtiene el diagrama fasorial de la Fig. B2, el cual se denomina *diagrama de Kapp*. En dicha figura el triángulo sombreado es el *triángulo de Kapp*.

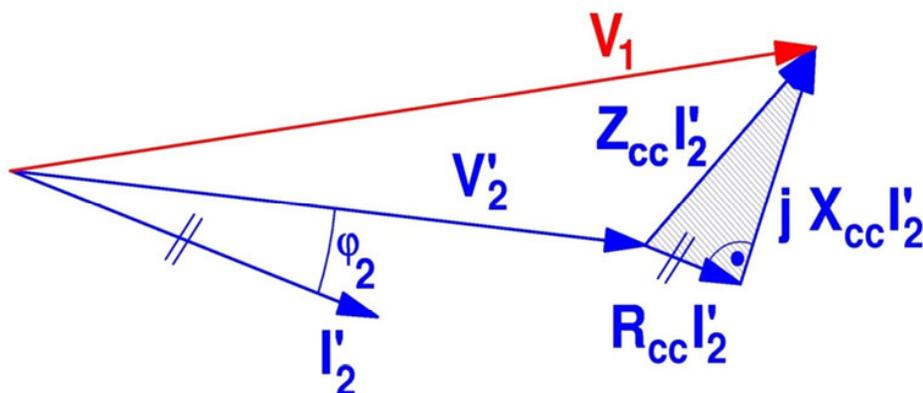


Fig. B2: Diagrama de Kapp. El triángulo rectángulo sombreado es el triángulo de Kapp.

El triángulo de Kapp es rectángulo y se obtiene multiplicando los lados del triángulo de impedancias de cortocircuito (Fig. 15) por la corriente secundaria reducida al estator I'_2 . Por lo tanto, los triángulos de Kapp (Fig. B2), de impedancias de cortocircuito (Fig. 15) y de caídas de tensión relativas (Fig. 16) son triángulos semejantes (los tres triángulos tienen los mismos ángulos entre sus lados).

CAÍDA DE TENSIÓN

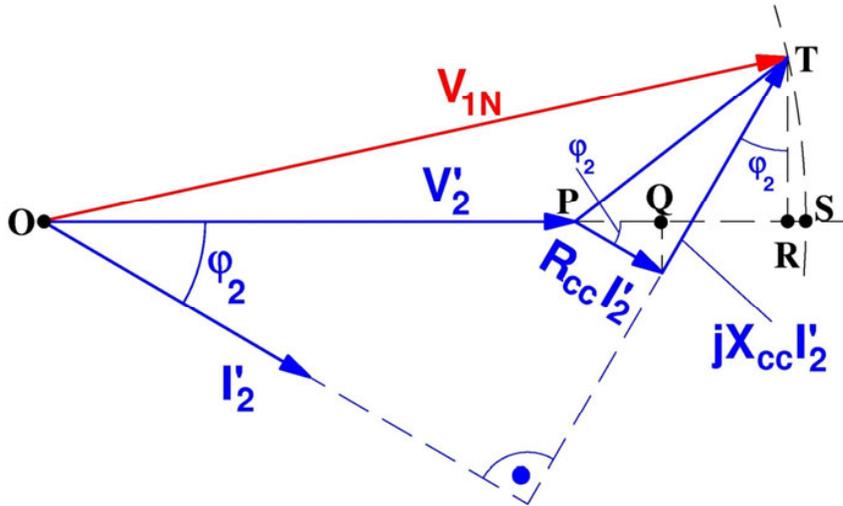


Fig. B3: Caída de tensión en un transformador

En este apartado se va a utilizar el circuito equivalente aproximado y el diagrama de Kapp para demostrar la fórmula (36) para la caída de tensión relativa ϵ_c .

En la Fig. B3 se muestra el diagrama de Kapp de un transformador cuyo primario está conectado a la tensión asignada V_{1N} y que está alimentando una carga con factor de potencia inductivo. En esta figura se han exagerado los ángulos entre fasores. En realidad los fasores de tensión primaria \bar{V}_{1N} y secundaria \bar{V}'_2 forman entre sí un ángulo muy pequeño; es decir, están prácticamente en fase.

En la Fig. B3 se puede apreciar que los segmentos \overline{OT} y \overline{OS} son iguales y su longitud es igual al valor eficaz V_{1N} . Por consiguiente, el segmento \overline{PS} es igual a la diferencia entre los valores eficaces V_{1N} de la tensión primaria y V'_2 de la tensión secundaria reducida al primario. El hecho de que en realidad el ángulo entre los fasores \bar{V}_{1N} y \bar{V}'_2 sea muy pequeño hace que el arco \overline{TS} y la recta \overline{TR} , perpendicular a \bar{V}'_2 , prácticamente se superpongan. Luego,

$$V_{1N} - V'_2 = \overline{PS} \approx \overline{PR} = \overline{PQ} + \overline{QR} = R_{cc} I'_2 \cos \varphi_2 + X_{cc} I'_2 \sin \varphi_2 \quad (B1)$$

Es fácil, comprobar que si el factor de potencia hubiera sido capacitivo el segundo término a la derecha del signo = de la relación (B1) estaría afectado de un signo negativo. Luego, se puede generalizar la relación (B1) poniendo un signo \pm así:

$$V_{1N} - V'_2 = R_{cc} I'_2 \cos \varphi_2 \pm X_{cc} I'_2 \sin \varphi_2 \quad (B2)$$

Multiplicando los dos lados del signo = de la expresión (B2) por 100, dividiéndolos por V_{1N} y teniendo en cuenta la penúltima de las relaciones (38), se llega a:

$$\frac{V_{1N} - V'_2}{V_{1N}} 100 = \frac{R_{cc} (C I_{1N}) \cos \varphi_2 \pm X_{cc} (C I_{1N}) \sin \varphi_2}{V_{1N}} 100$$

$$\epsilon_c = C (\epsilon_{Rcc} \cos \varphi_2 \pm \epsilon_{Xcc} \sin \varphi_2) \quad (36)$$