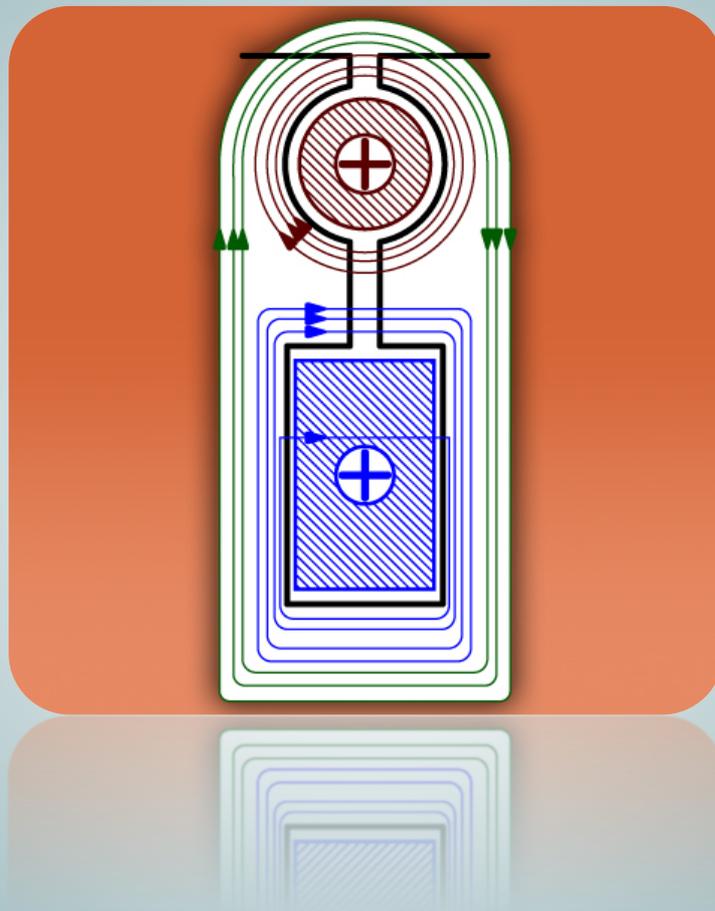


Máquinas Eléctricas II

Tema 1. 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/)

Este documento está diseñado para que se obtenga un texto impreso bien organizado si decide ahorrar papel imprimiéndolo a tamaño reducido, de forma que se incluyan dos páginas por cada hoja de papel A4 apaisado.

© 2018, 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

ÍNDICE

TRANSFORMADORES

TRANSFORMADORES MONOFÁSICOS.....	1
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 en régimen permanente.....	16
Caída de tensión.....	18
Pérdidas en un transformador.....	19
Rendimiento de un transformador.....	20
REGÍMENES TRANSITORIOS DE LOS TRANSFORMADORES.....	21
Cortocircuitos en transformadores	22
Corriente permanente de cortocircuito.....	22
Corriente transitoria de cortocircuito.....	23
Corriente de choque.....	28
Efectos de un cortocircuito sobre un transformador.....	29
Anexo: Formulario sobre el ensayo y las tensiones relativas de cortocircuito.....	30
Corriente de conexión de un transformador	31
Sobretensiones.....	36
Ondas de sobretensión.....	36
Efectos de las sobretensiones sobre un transformador	37

ÍNDICE

TRANSFORMADORES TRIFÁSICOS CON CARGAS EQUILIBRADAS....	42
Transformadores trifásicos con cargas equilibradas	42
Designación de terminales.....	51
Índice horario.....	54
TRANSFORMADORES TRIFÁSICOS CON CARGAS MONOFÁSICAS	64
Conexión estrella-estrella con carga monofásica entre fase y neutro.....	64
Banco de 3 transformadores monofásicos o transformador trifásico de 5 columnas	64
Transformador trifásico de tres columnas.....	66
Conexión estrella-estrella con carga monofásica fase-fase	67
Otras conexiones (Yd, Dy, Dd, Yz).....	67
Arrollamientos terciarios o de compensación.....	68
Bibliografía.....	68
TRANSFORMADORES TRIFÁSICOS CON CARGAS DESEQUILIBRADAS	70
Impedancias directa, inversa y homopolar en transformadores.....	70
Banco de tres transformadores monofásico estrella-estrella con ambos neutros unidos a la red	71
Transformador trifásico de 3 columnas estrella-estrella con ambos neutros unidos a la red.....	72
Banco de tres transformadores monofásico estrella-estrella con sólo el neutro primario unido a la red (o sólo el neutro secundario)	72
Transformador trifásico de tres columnas estrella-estrella con sólo el neutro primario conectado a la red.....	73
Banco de tres transformadores monofásicos estrella-triángulo con el neutro a la red	73
Transformador trifásico de tres columnas estrella-triángulo con el neutro a la red.....	74
Transformación triángulo-estrella con el neutro unido a la red.....	74
Transformaciones estrella-triángulo y triángulo-estrella con el neutro aislado.....	74
Otras conexiones.....	74
Bibliografía.....	74

ÍNDICE

ARMÓNICOS EN LAS CORRIENTES DE VACÍO, EN LOS FLUJOS Y EN LAS TENSIONES DE TRANSFORMADORES.....	76
Corriente de vacío en un transformador monofásico	76
Banco de tres transformadores monofásicos o transformador trifásico de cinco columnas con conexión estrella-estrella en vacío.....	78
a) Neutro primario conectado a la red.....	78
b) Neutro primario aislado.....	79
c) Comparación entre que el neutro primario esté unido a la red o esté aislado.....	81
Componentes simétricas y series de Fourier en sistemas trifásicos	82
Transformador trifásico de 3 columnas con conexión estrella-estrella en vacío.....	83
Transformación triángulo-estrella en vacío.....	84
Transformación estrella-triángulo en vacío.....	84
Transformación estrella-estrella con devanado terciario en triángulo en vacío.....	85
Transformación estrella-zig-zag en vacío.....	86
Bibliografía.....	86
TRANSFORMADORES EN PARALELO	87
Condiciones para que varios transformadores se puedan conectar en paralelo.....	87
Ecuación fundamental para transformadores en paralelo.....	88
Potencia máxima total.....	91
Transformador equivalente a varios en paralelo.....	95
TRANSFORMADORES DE MEDIDA Y DE PROTECCIÓN.....	97
Descripción. Transformadores de tensión y de intensidad.....	97
Magnitudes características de los transformadores de medida y de protección.....	98
Transformadores de tensión.....	98
Transformadores de intensidad.....	100
BIBLIOGRAFÍA GLOBAL PARA TRANSFORMADORES.....	101

Cada número de página de este índice constituye un enlace a dicha página

TRANSFORMADORES MONOFÁSICOS

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.

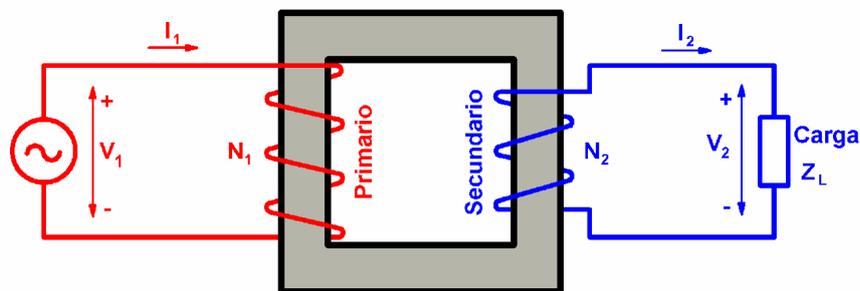


Fig. 1: Principio de funcionamiento de un transformador monofásico

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

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.

TRANSFORMADORES MONOFÁSICOS

transformador se suele dibujar con un devanado arrollado sobre una columna y el otro sobre la 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.

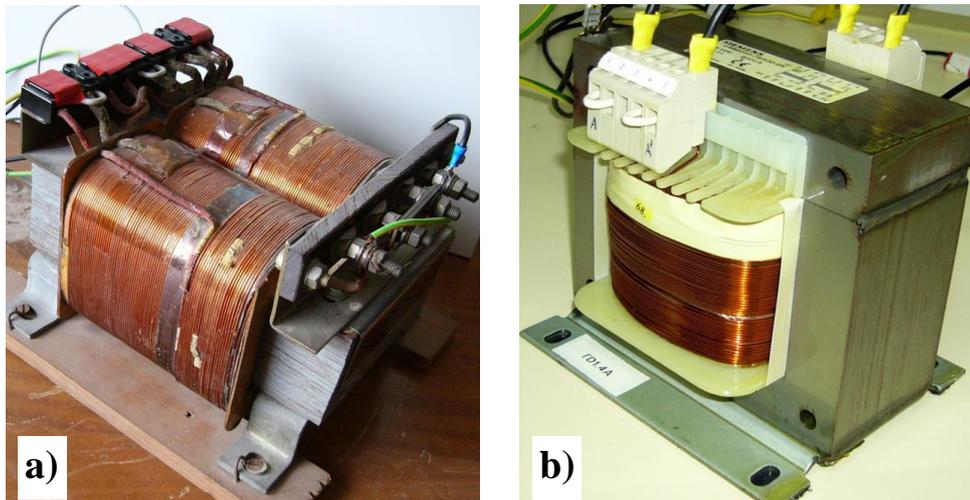


Fig. 2: Transformadores monofásicos: a) De columnas; b) Acorazado

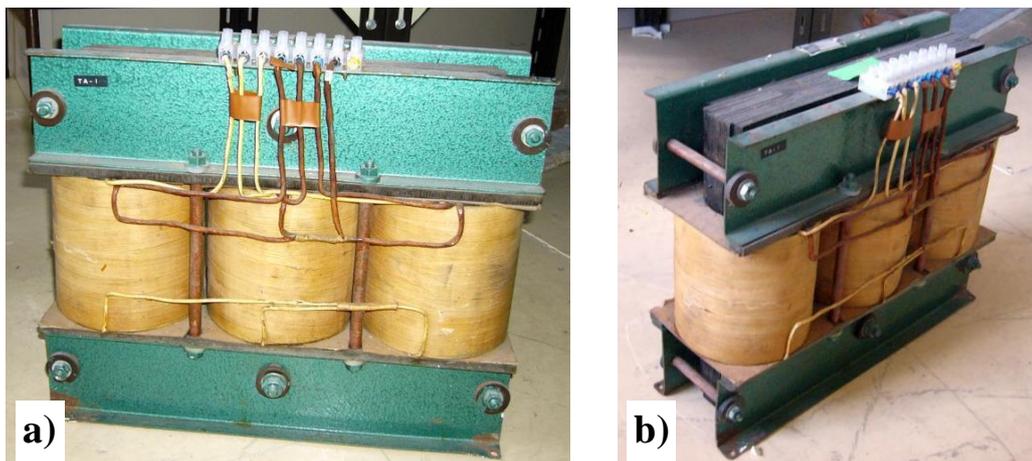


Fig. 3: Transformadores trifásicos de tres columnas

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 cuáles 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).

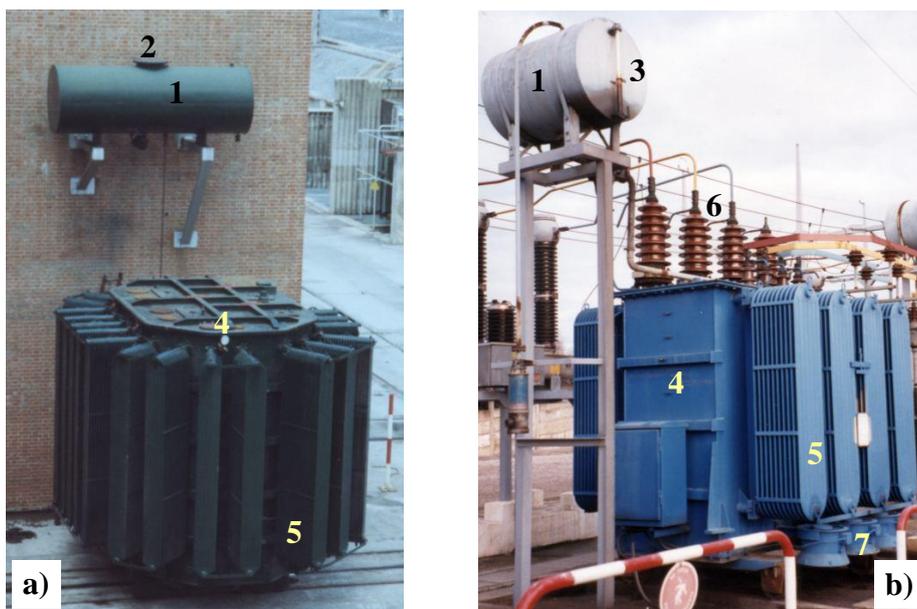


Fig. 5: Transformadores en baño de aceite

- | | |
|---|---------------------------|
| 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 | |

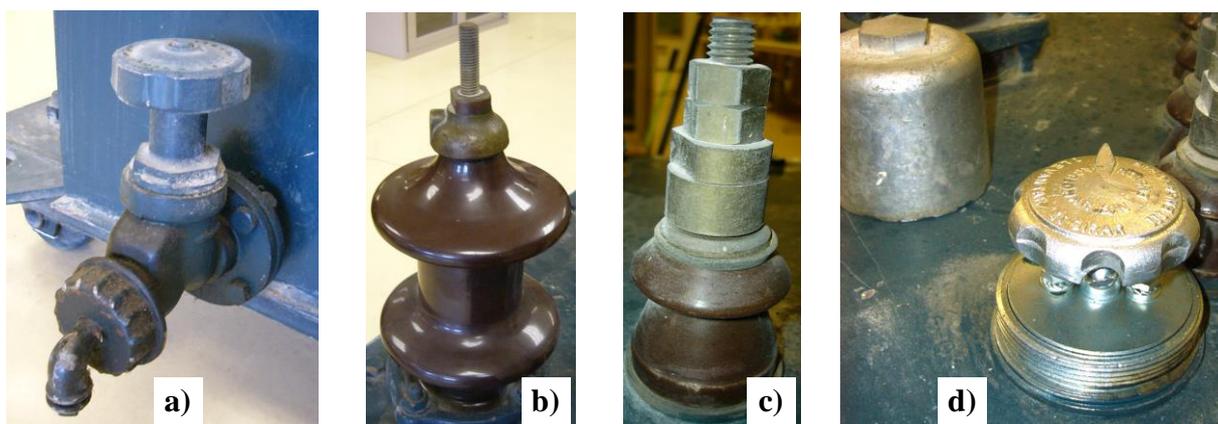


Fig. 6: Elementos de un transformador en baño de aceite:

- | | |
|-------------------------------|--------------------------------------|
| 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.

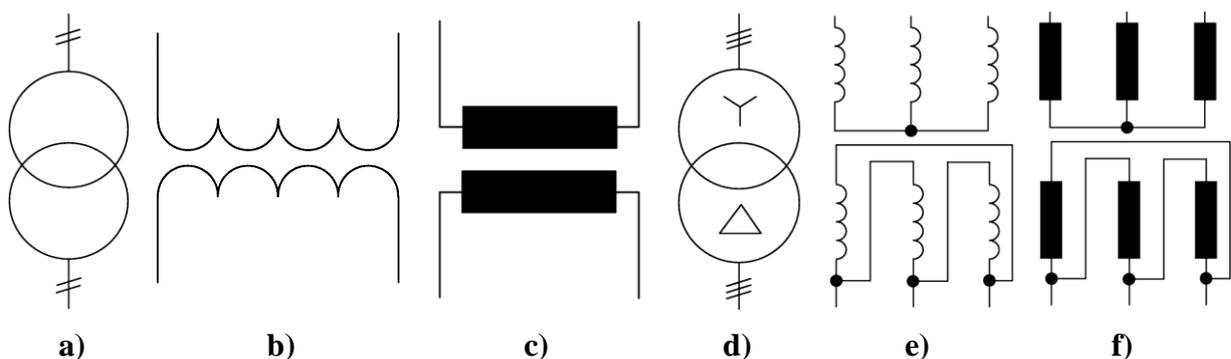


Fig. 7: Símbolos de transformadores

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 c.a.

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

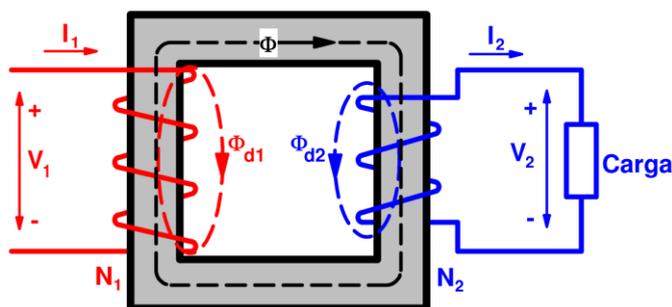


Fig. 8: Transformador en carga

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.

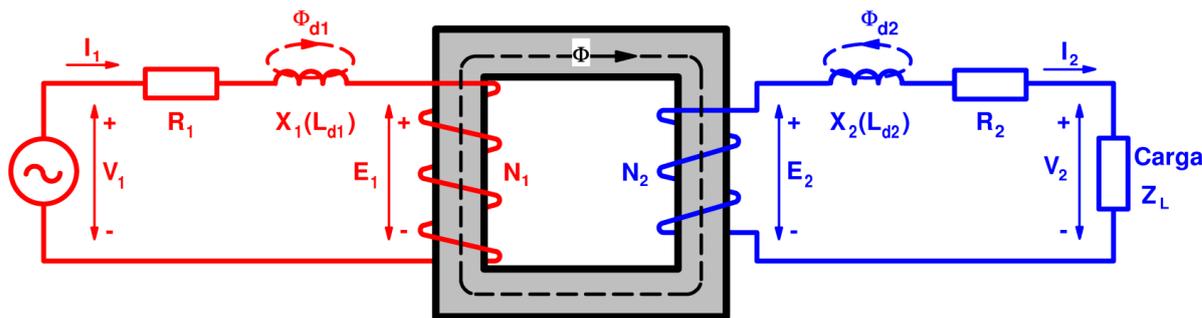


Fig. 9: Separación de las resistencias y de las reactancias de dispersión

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 de 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.

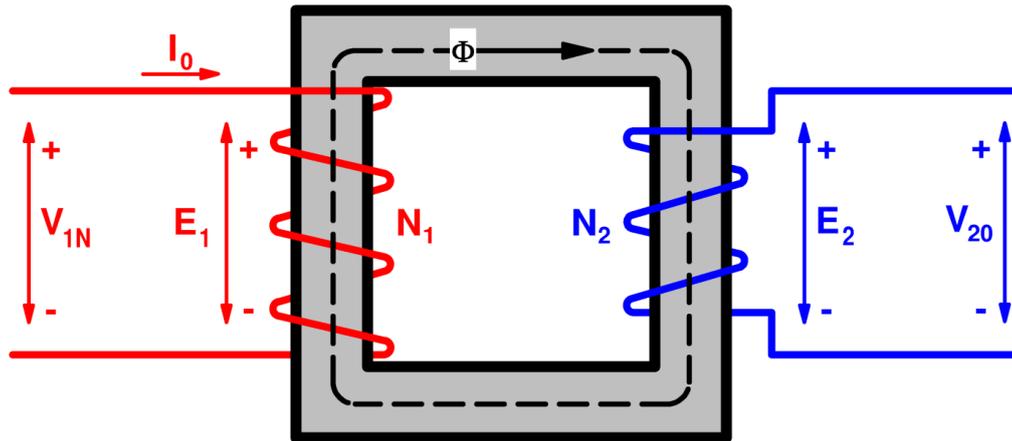


Fig. 10: Transformador en vacío

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) y aceptar que:

$$I_0 \ll \rightarrow \bar{V}_1 = \bar{E}_1 \quad (11a)$$

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) y (9), se deduce que

$$m = \frac{E_1}{E_2} = \frac{V_{1N}}{V_{20}} \quad V_{20} = V_{2N} \quad (12)$$

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:

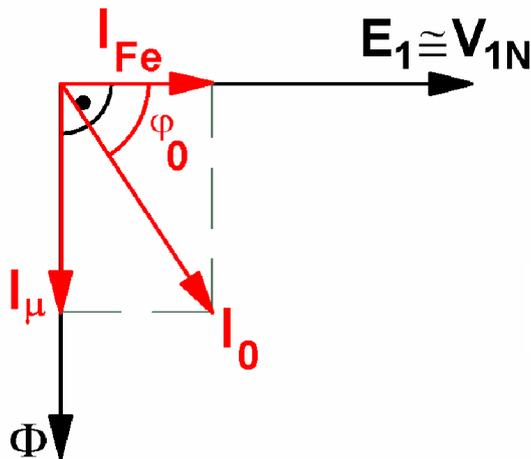


Fig. 11: Diagrama fasorial de un transformador

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

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).

$$\begin{aligned}
 \bar{V}'_2 &= m \bar{V}_2 \\
 \bar{I}'_2 &= \frac{\bar{I}_2}{m} \\
 Z'_L &= \frac{V'_2}{I'_2} = m^2 Z_L \\
 R'_2 &= m^2 R_2 \\
 X'_2 &= m^2 X_2
 \end{aligned}
 \tag{16}$$

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

$$N'_2 = N_1 = m \cdot N_2 \tag{17}$$

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:

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

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:

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

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:

$$\left. \begin{aligned} \bar{I}_1 &= \bar{I}_0 + \bar{I}'_2 \\ \bar{I}_0 &= \bar{I}_{Fe} + \bar{I}_\mu \\ \bar{V}_1 &= \bar{E}_1 + \bar{I}_1 (R_1 + jX_1) \\ \bar{E}'_2 &= \bar{E}_1 = \bar{V}'_2 + \bar{I}'_2 (R'_2 + jX'_2) \end{aligned} \right| \quad (21)$$

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.

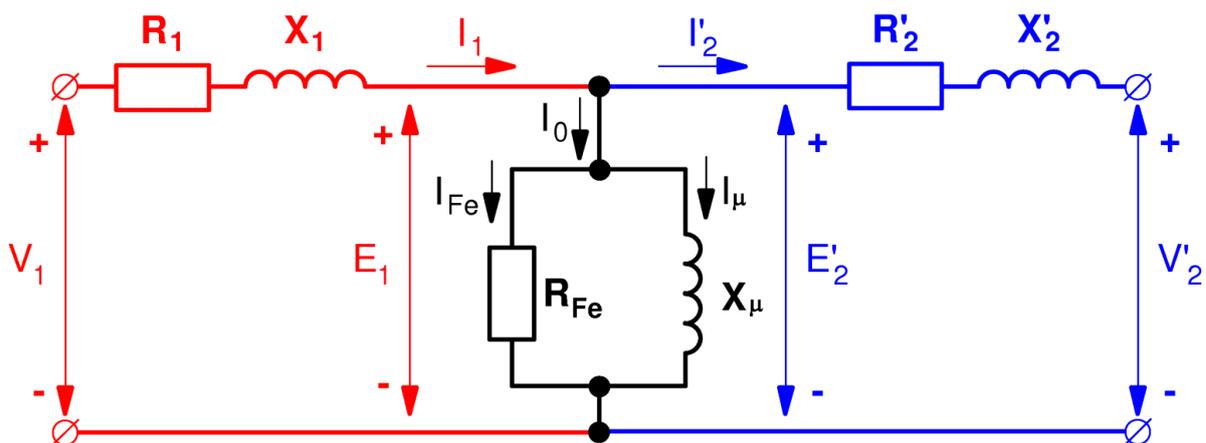


Fig. 12: Circuito equivalente de un transformador

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

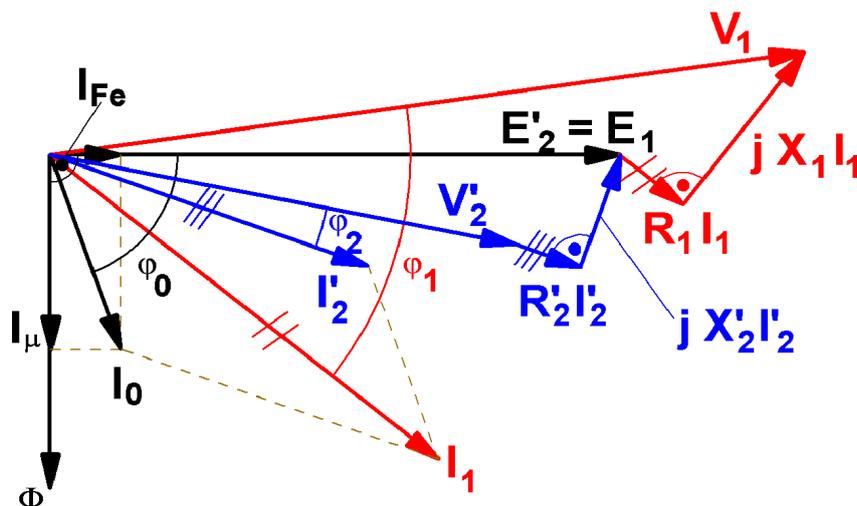


Fig. 13: Diagrama fasorial de un transformador con el secundario reducido al primario

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

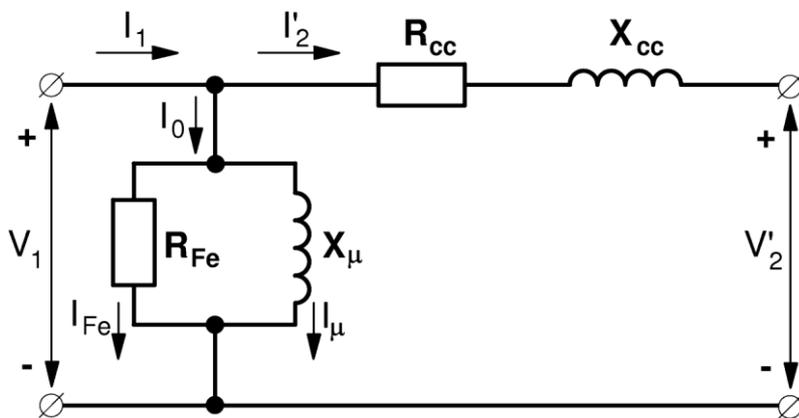


Fig. 14: Circuito equivalente aproximado de un transformador

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. 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:

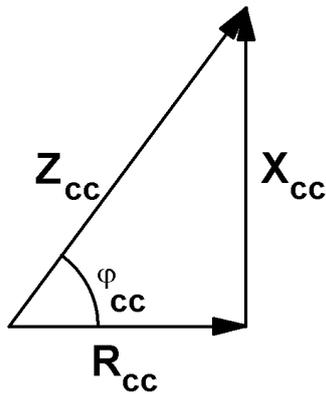


Fig. 15: Relación entre R_{cc} , X_{cc} y Z_{cc}

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

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

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,

Tensiones relativas de cortocircuito

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

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

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**:

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

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.

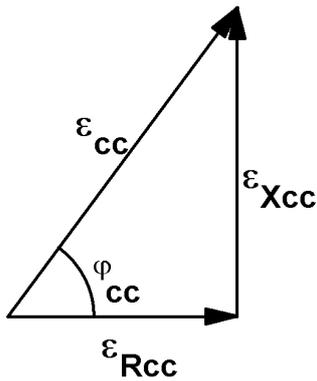
Los parámetros Z_{cc} , R_{cc} y X_{cc} son muy diferentes de unos transformadores a otros, mientras que los parámetros relativos ϵ_{cc} , $\epsilon_{R_{cc}}$ y $\epsilon_{X_{cc}}$ no varían tanto.

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:

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

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

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



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

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).

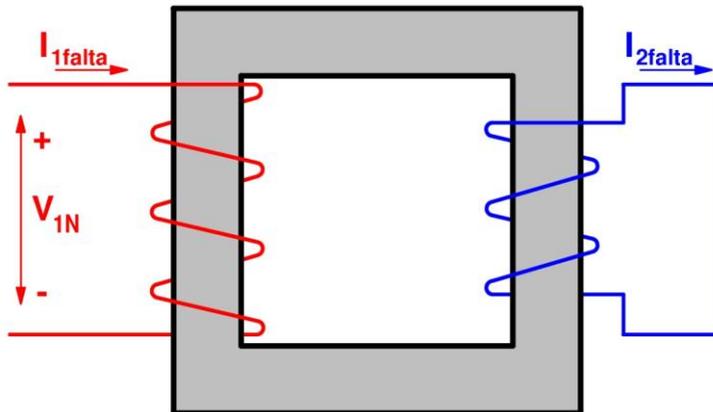


Fig. 17: Falta de cortocircuito

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.

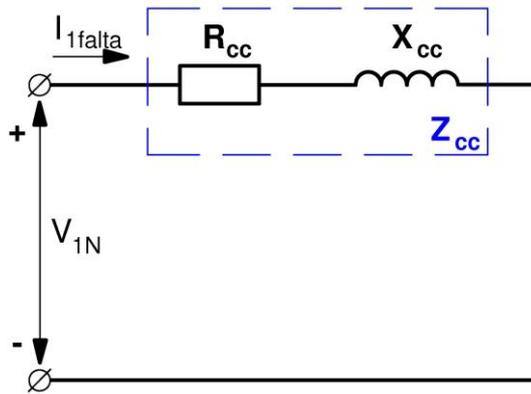


Fig. 18: Circuito equivalente durante la falta de cortocircuito

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:

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

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

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

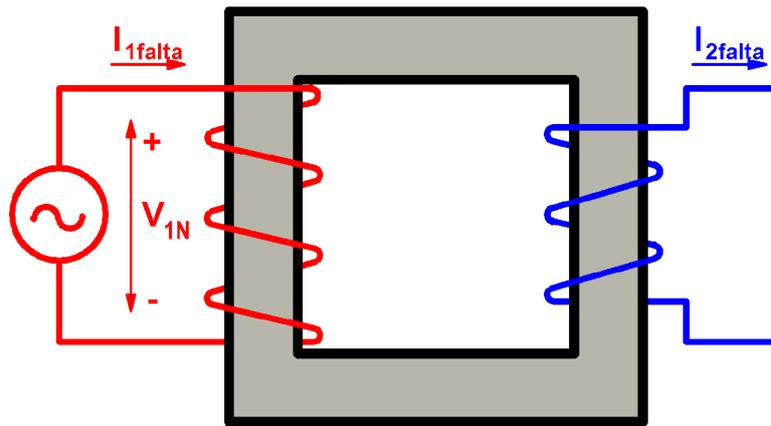
De las relaciones (29) se deduce lo que se ha anticipado anteriormente: “cuanto mayor es el valor de la tensión de cortocircuito ϵ_{cc} menores valores tienen las corrientes de cortocircuito en los devanados de un transformador”.

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

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

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 las corrientes alcanzan valores aún mayores.

FALLO DE CORTOCIRCUITO



$$I_{1falta} = I_{1N} \frac{100}{\varepsilon_{CC}}$$

$$I_{2falta} = I_{2N} \frac{100}{\varepsilon_{CC}}$$

CAÍDA DE TENSIÓN

$$\frac{V_1 - V'_2}{V_{1N}} 100 = \frac{(V_1 / m) - V_2}{V_{2N}} 100 = C \left(\left(\varepsilon_{R_{CC}} \cos \varphi_2 \right) \pm \left(\varepsilon_{X_{CC}} \sen \varphi_2 \right) \right)$$

(Signo + para cargas inductivas y signo – para cargas capacitivas)

Efecto Ferranti: Cuando la carga conectada al secundario de un transformador es capacitiva puede suceder que la tensión secundaria sea mayor que en vacío (caída de tensión negativa).

Cuando la tensión primaria es la nominal, se define la **regulación** para una carga dada así:

$$\varepsilon_C = \frac{V_{1N} - V'_2}{V_{1N}} 100 = \frac{V_{2N} - V_2}{V_{2N}} 100$$

PÉRDIDAS EN UN TRANSFORMADOR

Partiendo del circuito equivalente aproximado se obtiene que:

PÉRDIDAS EN EL HIERRO

$$P_{Fe} = R_{Fe} \cdot I_{Fe}^2 = \frac{V_{1N}^2}{R_{Fe}}$$

PÉRDIDAS EN EL COBRE

$$P_{Cu} = R_{cc} \cdot I_2^2 \approx R_{cc} \cdot I_1^2$$

Pérdidas en el cobre nominales:

$$P_{CuN} = R_{cc} \cdot I_{2N}^2 = R_{cc} \cdot I_{1N}^2$$

También se cumple que:
$$P_{CuN} = \frac{\varepsilon R_{cc}}{100} S_N$$

$$\frac{P_{Cu}}{P_{CuN}} = \left(\frac{I_2}{I_{1N}} \right)^2 = C^2$$

$$P_{Cu} = C^2 P_{CuN}$$

Índice de carga:

$$C = \frac{S}{S_N} \approx \frac{I_1}{I_{1N}} \approx \frac{I_2}{I_{1N}} = \frac{I_2}{I_{2N}}$$

PÉRDIDAS FIJAS Y VARIABLES

$$P_f = P_{Fe} (\approx P_0); \quad P_v = P_{Cu}$$

RENDIMIENTO DE UN TRANSFORMADOR

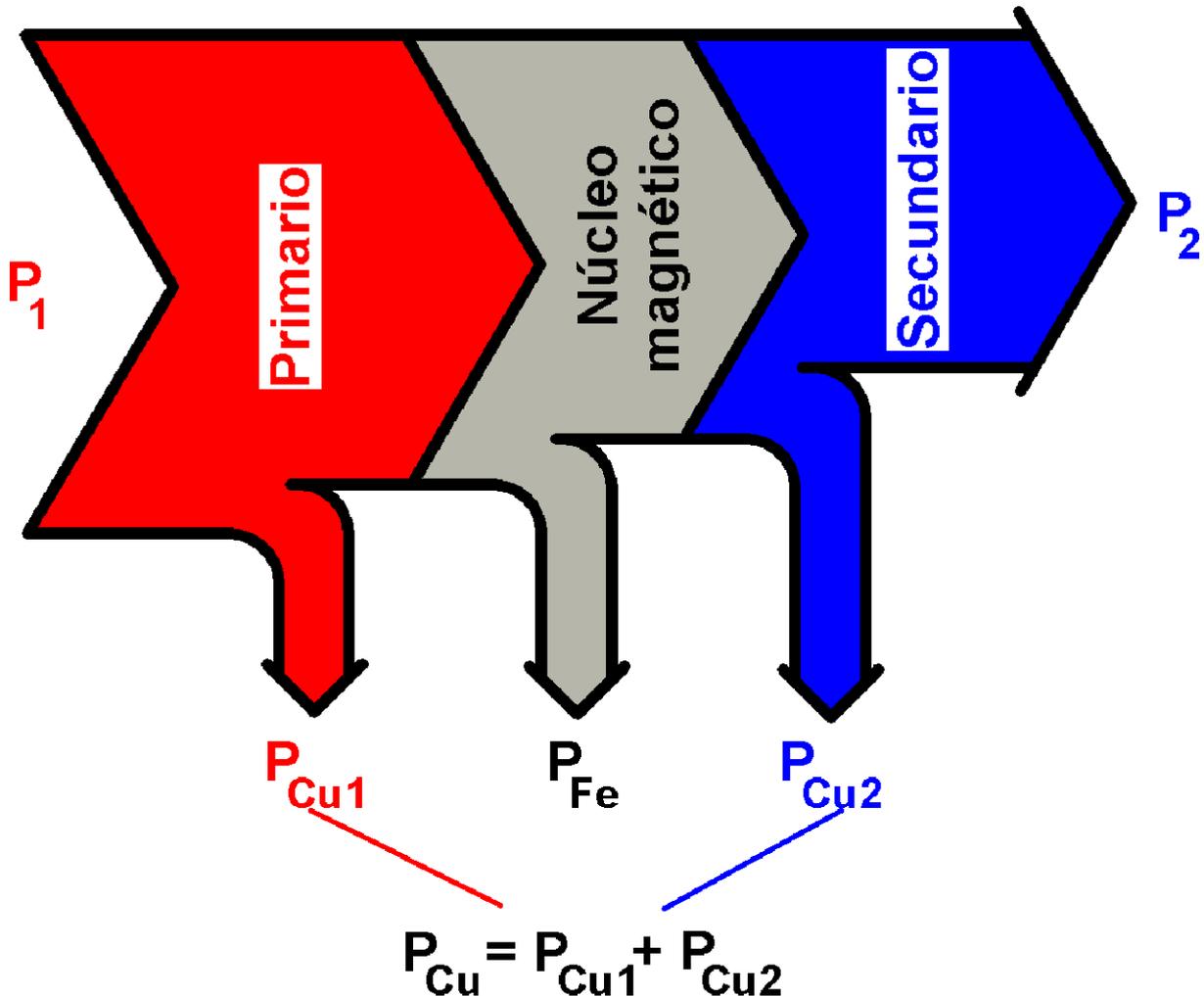
$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{C S_N \cos \varphi_2}{C S_N \cos \varphi_2 + P_{Fe} + C^2 P_{CuN}}$$

Rendimiento máximo

$$\eta_{\max} \rightarrow P_f = P_v \rightarrow P_{Fe} = P_{Cu}$$

$$P_{Fe} = C_{\text{opt}}^2 \cdot P_{CuN} \rightarrow C_{\text{opt}} = \sqrt{\frac{P_{Fe}}{P_{CuN}}}$$

Balance de potencias



UNIVERSIDAD DE CANTABRIA

**DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA ELÉCTRICA
Y ENERGÉTICA**

REGÍMENES TRANSITORIOS
DE LOS
TRANSFORMADORES

Miguel Angel Rodríguez Pozueta

REGÍMENES TRANSITORIOS DE LOS TRANSFORMADORES**1.- CORTOCIRCUITOS EN TRANSFORMADORES****1.1.- Corriente permanente de cortocircuito**

Un cortocircuito es un accidente que se produce cuando se cortocircuita el secundario de un transformador estando su primario conectado a la tensión asignada. A diferencia del ensayo de cortocircuito, en el que el transformador se alimenta a una tensión reducida para que las corrientes que circulan por los devanados no sean peligrosas, en el fallo de cortocircuito van a circular corrientes muy altas, varias veces superiores a la intensidad asignada.

Dado que la corriente de vacío es pequeña frente a la intensidad asignada ($I_0 = 1a3\% I_{1N}$), resulta despreciable frente a una corriente mucho mayor que la asignada como es la corriente de cortocircuito. Por lo tanto, para el estudio de la corriente de cortocircuito se puede prescindir de la rama en paralelo del circuito equivalente y utilizar el de la figura 1:

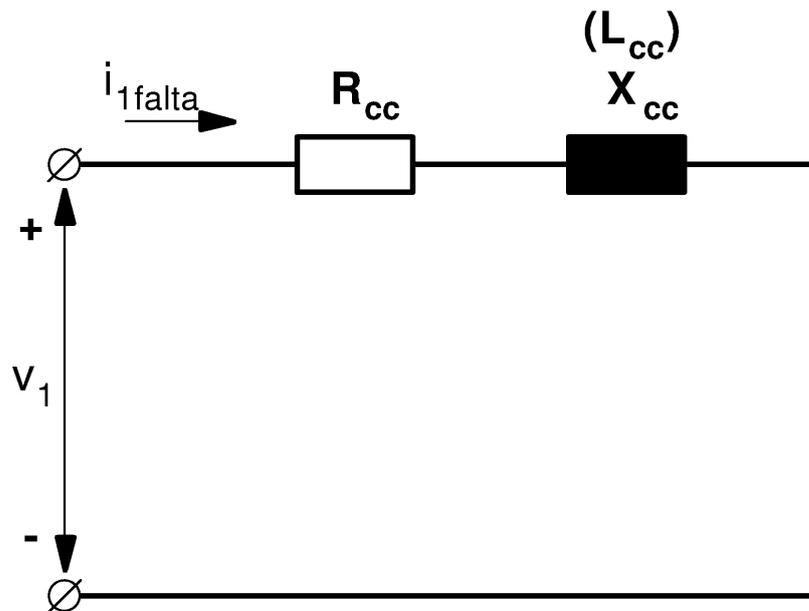


Fig. 1: Circuito equivalente de un transformador en cortocircuito

Si la tensión de alimentación es la asignada, cuyo valor eficaz es V_{1N} , la corriente de cortocircuito en régimen permanente tiene un valor eficaz I_{1falta} que se puede obtener aplicando la Ley de Ohm en la figura 1:

$$I_{1falta} = \frac{V_{1N}}{\sqrt{R_{cc}^2 + X_{cc}^2}} = \frac{V_{1N}}{Z_{cc}} \quad (1)$$

Operando se llega a

$$I_{1falta} = \frac{V_{1N}}{Z_{cc}} \times \frac{I_{1N}}{I_{1N}} \times \frac{100}{100} = I_{1N} \times 100 \times \frac{V_{1N}}{Z_{cc} I_{1N} 100}$$

$$\boxed{I_{1falta} = I_{1N} \times \frac{100}{\epsilon_{cc}}} \quad (2)$$

Por otra parte, como se desprecia la corriente de vacío I_0 , se tiene que:

$$I_{1falta} = I'_{2falta} + I_0 = I'_{2falta} = \frac{I_{2falta}}{m}$$

Es decir, en un cortocircuito se cumple de forma prácticamente exacta que el cociente entre las intensidades del primario y del secundario es igual a la inversa de la relación de transformación. Así pues, la corriente de cortocircuito en el secundario tiene un valor eficaz I_{2falta} que se puede calcular así:

$$I_{2falta} = m I_{1falta} = m I_{1N} \frac{100}{\epsilon_{cc}}$$

$$\boxed{I_{2falta} = I_{2N} \times \frac{100}{\epsilon_{cc}}} \quad (3)$$

Las relaciones (2) y (3) indican que un valor elevado de la corriente relativa de cortocircuito ϵ_{cc} evita que durante un cortocircuito circulen corrientes excesivamente altas por los devanados del transformador. Pero, por otra parte, valores elevados de ϵ_{cc} dan lugar a que se produzcan altas caídas de tensión en el transformador. Por lo tanto, a la hora de diseñar un transformador habrá que dar a ϵ_{cc} un valor de compromiso tal que las corrientes de cortocircuito tengan un valor razonable sin que se produzcan caídas de tensión excesivas en la máquina. En la práctica, para los transformadores de pequeña potencia, inferior a 1000 kVA, se da al coeficiente ϵ_{cc} un valor comprendido entre 1 y 6%; mientras que, en los transformadores grandes, de más de 1000 kVA, este coeficiente adopta valores entre 6 y 13%.

1.2.- Corriente transitoria de cortocircuito

La corriente permanente de cortocircuito estudiada en el apartado anterior no aparece de forma instantánea al producirse el fallo de cortocircuito. En un elemento inductivo, como es un transformador, las corrientes no pueden variar bruscamente y se producirá un régimen transitorio desde el momento en que se inicia el cortocircuito hasta que se establece la corriente de régimen permanente.

Durante este proceso transitorio el transformador se puede seguir analizando mediante el circuito equivalente de la Fig. 1; sólo que habrá que utilizar la inductancia L_{cc} en lugar de la reactancia X_{cc} ($X_{cc} = \omega L_{cc} \rightarrow L_{cc} = X_{cc} / \omega$) y se trabajará con los valores instantáneos de la corriente y de la tensión y no con sus valores eficaces.

Se va a suponer que el cortocircuito se produce en el instante $t = 0$, que el transformador funcionaba previamente en vacío y que la tensión del primario es así:

$$v_1 = \sqrt{2} V_{1N} \text{Cos}(\omega t + \psi) \quad (4)$$

Como se está forzando a que el momento en que se produce el cortocircuito sea el instante $t = 0$, el ángulo de desfase ψ de la ecuación (4) dependerá de cuál es el valor instantáneo de la tensión v_1 en el momento de iniciarse el cortocircuito. Habrá que dar al ángulo ψ un valor tal que para $t = 0$ la ecuación (4) dé el valor que tiene v_1 en el instante de producirse el cortocircuito.

Dado el pequeño valor de la corriente de vacío comparada con la de cortocircuito, se la va a despreciar y se utilizará la siguiente condición inicial:

$$i_{1\text{falta}}|_{t=0} = 0 \quad (5)$$

La ecuación diferencial que relaciona los valores instantáneos de la tensión y de la corriente del circuito de la Fig. 1 es:

$$\boxed{v_1 = R_{cc} i_{1\text{falta}} + L_{cc} \frac{di_{1\text{falta}}}{dt}} \quad (6)$$

Si se resuelve la ecuación (6) por el método clásico se tiene que la corriente de cortocircuito es igual a la suma de una solución particular (la corriente de régimen permanente, cuyo valor instantáneo es $i_{1\text{perm}}$) y la solución de la ecuación homogénea (que se denominará $i_{1\text{tran}}$):

$$i_{1\text{falta}} = i_{1\text{perm}} + i_{1\text{tran}} \quad (7)$$

El valor eficaz $I_{1\text{falta}}$ de la corriente de régimen permanente se obtuvo en el apartado anterior (relación (2)) y la impedancia de cortocircuito tiene un argumento φ_{cc} :

$$\bar{Z}_{cc} = R_{cc} + jX_{cc} = Z_{cc} \angle \varphi_{cc} \quad (8)$$

En consecuencia, teniendo en cuenta también la ecuación (4), la corriente permanente tiene un valor instantáneo $i_{1\text{perm}}$ dado por la siguiente relación

$$i_{1\text{perm}} = \sqrt{2} I_{1\text{falta}} \text{Cos}(\omega t + \psi - \varphi_{cc}) \quad (9)$$

Para obtener $i_{1\text{tran}}$ hay que resolver la ecuación homogénea; es decir, la ecuación (6) sin las fuentes (con la tensión v_1 igual a cero):

$$0 = R_{cc} i_{1\text{tran}} + L_{cc} \frac{di_{1\text{tran}}}{dt} \quad (10)$$

La solución de (10) es de la forma:

$$i_{1\text{tran}} = C e^{-\frac{t}{\tau_{cc}}} \quad (11)$$

donde C es una constante que se determinará más tarde.

Sustituyendo (11) en (10) se obtiene que:

$$0 = R_{cc} C e^{-\frac{t}{\tau_{cc}}} + L_{cc} C e^{-\frac{t}{\tau_{cc}}} \left(-\frac{1}{\tau_{cc}} \right) \rightarrow \tau_{cc} = \frac{L_{cc}}{R_{cc}} = \frac{X_{cc}}{\omega R_{cc}} = \frac{\varepsilon X_{cc}}{\omega \varepsilon R_{cc}} \quad (12)$$

Imponiendo la condición inicial (5) y teniendo presente las relaciones (7), (9) y (11), se deduce que la constante C vale:

$$0 = i_{1\text{falta}}|_{t=0} = \sqrt{2} I_{1\text{falta}} \text{Cos}(\psi - \varphi_{cc}) + C$$

$$C = -\sqrt{2} I_{1\text{falta}} \text{Cos}(\psi - \varphi_{cc}) \quad (13)$$

Es decir, el valor inicial C de la corriente $i_{1\text{tran}}$ es igual al valor inicial de $i_{1\text{perm}}$ cambiado de signo.

La ecuación final de la corriente de cortocircuito se obtiene combinando las relaciones (7), (9), (11), (12) y (13):

$$i_{1\text{falta}} = \sqrt{2} I_{1\text{falta}} \left[\text{Cos}(\omega t + \psi - \varphi_{cc}) - \text{Cos}(\psi - \varphi_{cc}) e^{-\frac{t}{X_{cc}/\omega R_{cc}}} \right] \quad (14)$$

En la figura 2 se muestra un ejemplo de cómo son las corrientes $i_{1\text{falta}}$, $i_{1\text{perm}}$ e $i_{1\text{tran}}$ en un cortocircuito.

Un caso interesante es cuando el cortocircuito se produce en un instante tal que el ángulo $(\psi - \varphi_{cc})$ vale $\pi/2$ o $3\pi/2$; es decir, cuando la corriente permanente de cortocircuito $i_{1\text{perm}}$ tiene un valor inicial nulo. En este caso la constante C (relación (13)) vale cero y no existe la componente transitoria $i_{1\text{tran}}$. Este caso es el más favorable pues la corriente de cortocircuito entra directamente en el régimen permanente y no existe un proceso transitorio donde la corriente puede alcanzar mayores valores. Esta situación está representada en la Fig. 3.

Por el contrario, la situación más desfavorable, cuando la corriente alcanza mayores valores durante el régimen transitorio del cortocircuito, es cuando el ángulo $(\psi - \varphi_{cc})$ vale 0 o π ; es decir, cuando el cortocircuito empieza justo en el momento en que la corriente permanente de cortocircuito $i_{1\text{perm}}$ tiene un valor máximo positivo o negativo. En la Fig. 4 se representa uno de estos casos (cuando $(\psi - \varphi_{cc}) = \pi$).

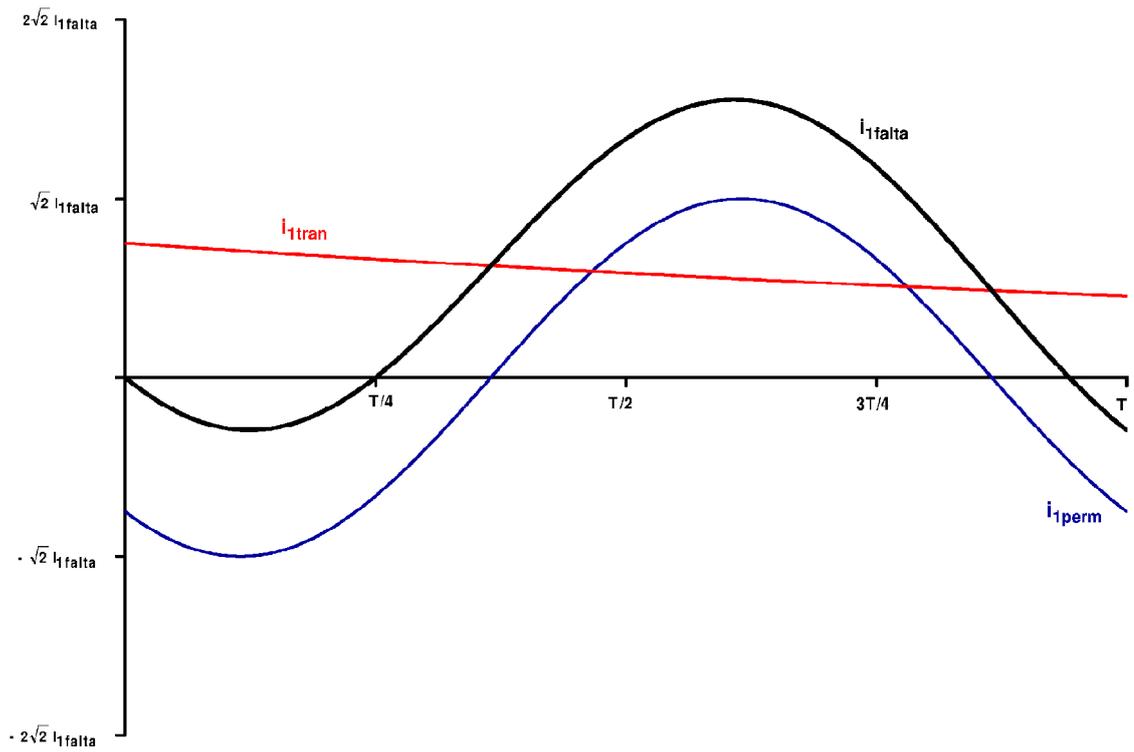


Fig. 2: Evolución de la corriente durante el cortocircuito de un transformador

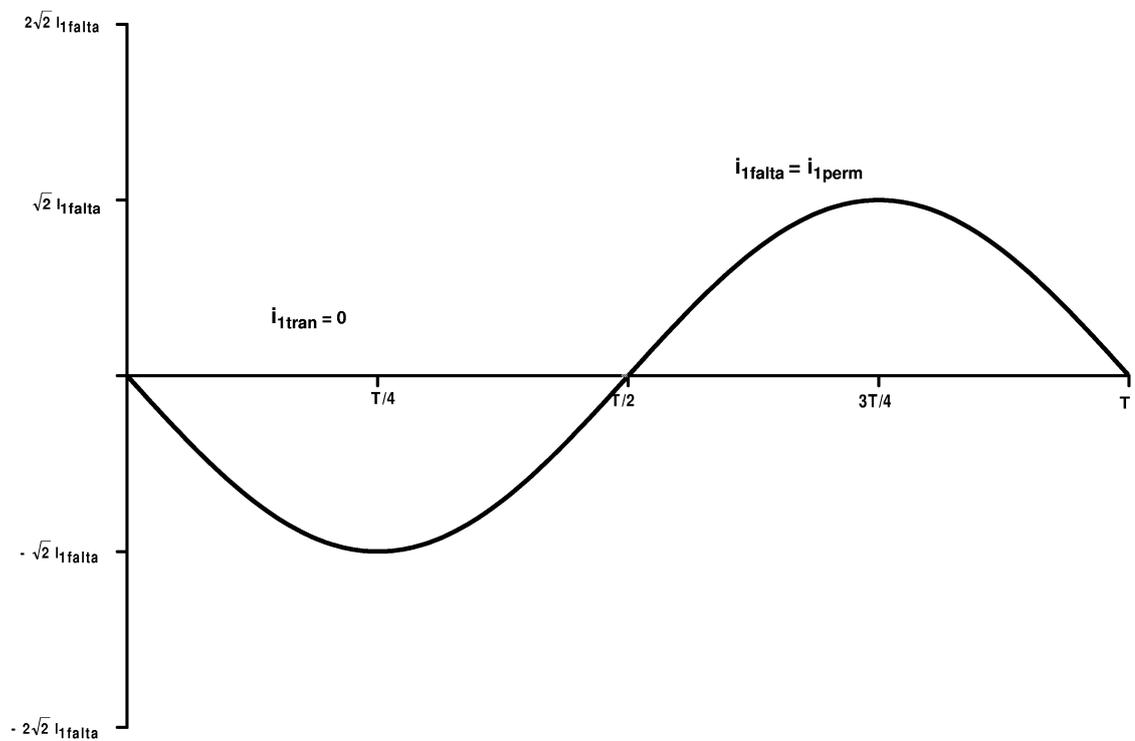


Fig. 3: Evolución de la corriente de cortocircuito de un transformador en el caso más favorable

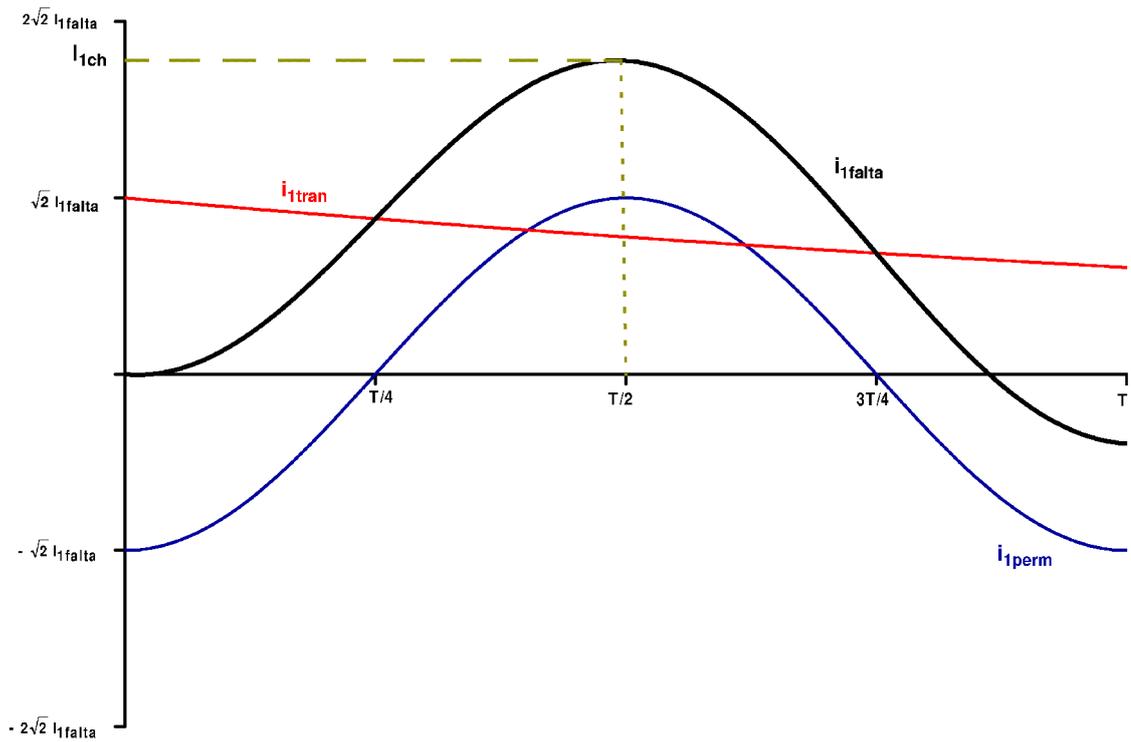


Fig. 4: Evolución de la corriente de cortocircuito de un transformador en el caso más desfavorable y corriente de choque

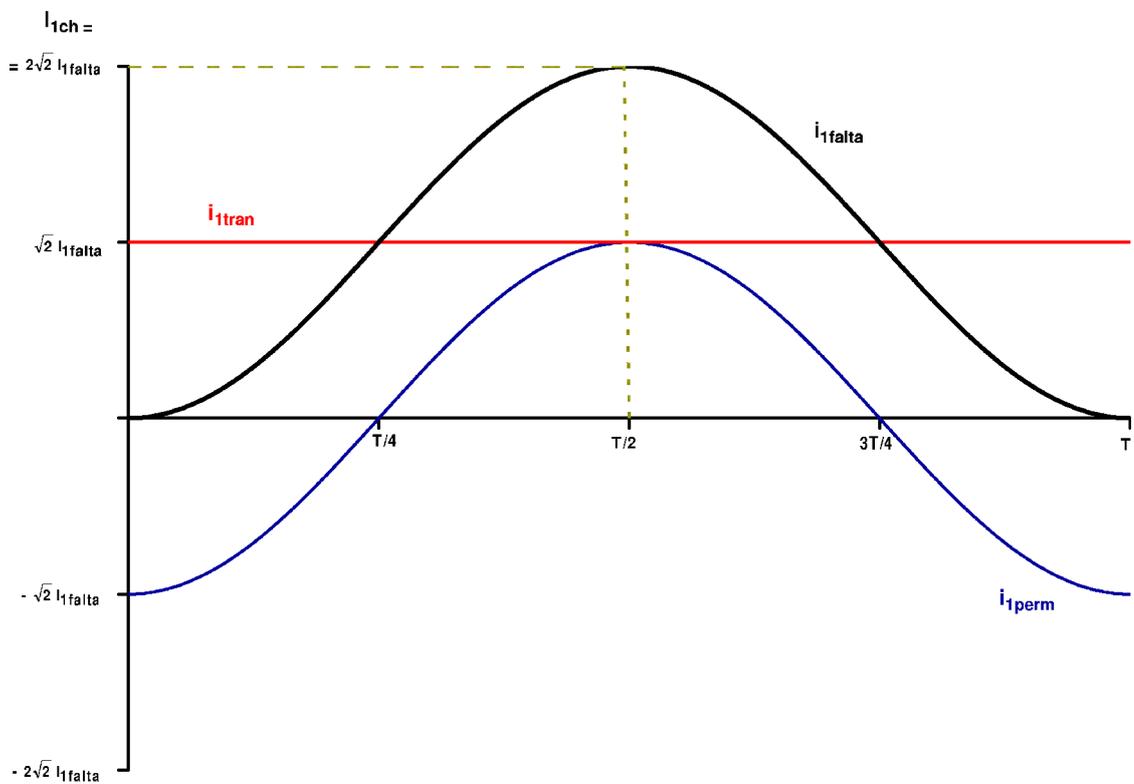


Fig. 5: Obtención del límite superior de la corriente de choque

1.3.- Corriente de choque

Dado que las elevadas corrientes que circulan por los devanados de un transformador durante un cortocircuito son peligrosas para la integridad del mismo, a la hora de proteger el transformador contra estas corrientes resultará interesante el conocer cuál será el máximo valor que éstas pueden llegar a alcanzar.

La corriente de choque I_{1ch} es el máximo valor instantáneo que puede alcanzar la corriente que circula por el primario del transformador cuando el cortocircuito se produce en las peores condiciones posibles.

Como ya se indicó en el apartado anterior, el cortocircuito se produce en las peores condiciones si se inicia cuando la componente permanente i_{1perm} alcanza su valor máximo positivo o negativo. Observando la Fig. 3 se aprecia que en este caso la corriente i_{1falta} alcanza su valor máximo cuando el tiempo t vale aproximadamente la mitad del periodo T .

Por lo tanto,

$$I_{1ch} = i_{1falta} \Big|_{\substack{t=T/2 \\ C=\sqrt{2} I_{1falta}}} \\ I_{1ch} = \sqrt{2} I_{1falta} \left[1 + e^{-\frac{T/2}{\tau_{cc}}} \right] \quad (15)$$

Partiendo de la relación (12) se deduce que:

$$\frac{T/2}{\tau_{cc}} = \frac{T/2}{\frac{X_{cc}}{\omega R_{cc}}} = \frac{(T/2)(2\pi f R_{cc})}{X_{cc}} = \frac{\left(\frac{T}{2}\right)\left(\frac{2\pi}{T} R_{cc}\right)}{X_{cc}} = \pi \frac{R_{cc}}{X_{cc}} = \pi \frac{\varepsilon_{Rcc}}{\varepsilon_{Xcc}} \quad (16)$$

pues se cumple que

$$\omega = 2\pi f = \frac{2\pi}{T}$$

Luego, combinando las expresiones (15) y (16) se obtiene que:

$$I_{1ch} = \sqrt{2} I_{1falta} \left[1 + e^{-\pi \frac{R_{cc}}{X_{cc}}} \right] = \sqrt{2} I_{1falta} \left[1 + e^{-\pi \frac{\varepsilon_{Rcc}}{\varepsilon_{Xcc}}} \right] \quad (17)$$

Se puede encontrar otra expresión de la corriente de choque más inexacta, pero muy cómoda y fácil de calcular. Realmente, lo que se va a obtener es un límite superior de la corriente de choque; es decir, la corriente de choque será igual o inferior al valor que se va a determinar. Para ello, supóngase un caso peor que la realidad en el que la constante de tiempo

τ_{cc} es tan grande que se puede aceptar que durante el primer medio ciclo de la onda la componente i_{1tran} apenas disminuye y permanece constante e igual a $\sqrt{2} I_{Ifalta}$. En este caso, tal como se aprecia en la Fig. 5, la corriente de choque se produciría exactamente al cabo de $T/2$ segundos y valdrá:

$$I_{Ich} = 2 \sqrt{2} I_{Ifalta} \quad (18)$$

En realidad, la constante de tiempo τ_{cc} no es tan grande y la corriente de choque tiene valores más pequeños que el indicado en (18). Así, en la práctica I_{Ich} alcanza valores comprendidos entre estos límites:

$$I_{Ich} = \begin{cases} (1,2 \text{ a } 1,3) \sqrt{2} I_{Ifalta} & \text{Para transformadores pequeños} \\ (1,7 \text{ a } 1,85) \sqrt{2} I_{Ifalta} & \text{Para transformadores grandes} \end{cases} \quad (19)$$

Por lo tanto, a efectos prácticos se puede decir que la corriente de choque de un transformador cumplirá que:

$$I_{Ich} \leq 1,8 \sqrt{2} I_{Ifalta}$$

$$\boxed{I_{Ich} \leq 2,5 I_{Ifalta}} \quad (20)$$

Así pues, si basta con un cálculo rápido y aproximado de la corriente de choque se utilizará la expresión (20), pero si se desea un cálculo más exacto se deberá emplear la relación (17).

1.4.- Efectos de un cortocircuito sobre un transformador

Las elevadas corrientes que circulan por los devanados de un transformador cuando se produce un cortocircuito dan lugar a efectos peligrosos para la máquina.

La primera consecuencia es de tipo térmico. En efecto, al ser las corrientes de cortocircuito varias veces mayores que las corrientes asignadas de los devanados del transformador aparecen unas pérdidas por efecto Joule (pérdidas en el cobre) muy superiores a las asignadas, lo que origina un aumento peligroso de la temperatura.

Ahora bien, la masa del transformador impide que este aumento de temperatura sea instantáneo; tiene que pasar un tiempo desde que empieza el cortocircuito hasta que el calor generado por éste eleve la temperatura de la máquina hasta niveles peligrosos. Este tiempo de calentamiento es mucho mayor que la constante de tiempo τ_{cc} , lo que significa que prácticamente durante todo este tiempo de calentamiento las corrientes que circulan por los devanados del transformador están en su régimen permanente (porque la componente transitoria se anula en los primeros momentos, cuando el transformador apenas a empezado a aumentar su temperatura). Dicho de otra manera, la componente transitoria de las corrientes de cortocircuito de los devanados proporciona una cantidad de calor muy pequeña comparada con la necesaria para elevar la temperatura del transformador hasta valores peligrosos y, en consecuencia, se la puede despreciar y sólo tener en cuenta la componente permanente.

REGÍMENES TRANSITORIOS DE LOS TRANSFORMADORES

Así pues, a la hora de analizar el efecto térmico de las corrientes de cortocircuito bastará con trabajar con los valores eficaces I_{1falta} e I_{2falta} de la componente permanente de las corrientes de cortocircuito.

El otro efecto peligroso de las corrientes de cortocircuito es de tipo mecánico. Los bobinados de la máquina son, al fin de cuentas, una serie de conductores próximos y recorridos por corrientes. Es sabido cuando existen dos conductores recorridos por corrientes aparecen entre ellos unas fuerzas (Fuerzas de Laplace) que tienden a desplazarlos o a deformarlos. Estas fuerzas surgen de forma instantánea en cuanto circulan las corrientes y alcanzan mayores valores cuanto mayores son las corrientes. Por lo tanto, a la hora de analizar estas fuerzas en un cortocircuito habrá que considerar el caso más peligroso que es cuando la corriente de cortocircuito toma su mayor valor instantáneo; esto es, cuando circula la corriente de choque I_{1ch} .

Las fuerzas que aparecen sobre los devanados del transformador durante un cortocircuito tienen dos componentes: *radiales*, que tienden a comprimir el devanado interior y a expandir el devanado exterior, y *axiales*. Para prevenir los efectos perjudiciales de estas fuerzas habrá que diseñar el transformador de forma que los devanados estén firmemente sujetos y puedan soportar estas fuerzas incluso cuando circula la corriente de choque. Por lo tanto, la magnitud de la corriente de cortocircuito a emplear para estudiar los efectos mecánicos de los cortocircuitos en los transformadores es la corriente de choque I_{1ch} .

1.5.- Anexo: Formulario sobre el ensayo y las tensiones relativas de cortocircuito

- Ensayo de cortocircuito cortocircuitando el primario y alimentando por el secundario:

$$V_{2corto} \quad I_{2corto} \quad P_{corto}$$

- Ensayo de cortocircuito cortocircuitando el secundario y alimentando por el primario:

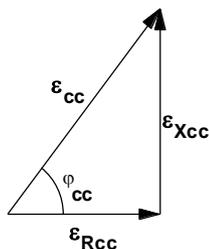
$$V_{1corto} \quad I_{1corto} \quad P_{corto}$$

- Ensayo de cortocircuito cortocircuitando el secundario y alimentando por el primario de forma que circule la corriente asignada (es un caso particular del anterior):

$$V_{1cc} \quad I_{1N} \quad P_{cc} \quad (P_{cc} \approx P_{CuN})$$

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

- Tensiones relativas de cortocircuito:



$$\epsilon_{cc} = \frac{V_{1cc}}{V_{1N}} \cdot 100 = \frac{Z_{cc} \cdot I_{1N}}{V_{1N}} \cdot 100$$

$$\epsilon_{Rcc} = \frac{R_{cc} \cdot I_{1N}}{V_{1N}} \cdot 100 = \frac{P_{cc}}{S_N} \cdot 100 = \epsilon_{cc} \cdot \cos \varphi_{cc}$$

$$\epsilon_{Xcc} = \frac{X_{cc} \cdot I_{1N}}{V_{1N}} \cdot 100 = \sqrt{\epsilon_{cc}^2 - \epsilon_{Rcc}^2} = \epsilon_{cc} \cdot \sin \varphi_{cc}$$

2.- CORRIENTE DE CONEXIÓN DE UN TRANSFORMADOR

En este capítulo se va a estudiar la corriente que circula por el primario de un transformador en el momento en que se lo conecta a la red.

Para simplificar el estudio se va a analizar un transformador que se conecta a la red estando en vacío; es decir, con el devanado secundario en circuito abierto. De momento, no se va a tener en cuenta el efecto de la histéresis del circuito magnético del transformador, por lo que no se considerará el flujo remanente que pueda haber quedado en el núcleo magnético debido a magnetizaciones anteriores y se supondrá que la relación entre el flujo y la corriente que circula por el primario viene dada por la curva de magnetización de la Fig. 7.

Cuando este transformador esté conectado por el primario a la tensión asignada y funcione en vacío, la corriente de vacío en régimen permanente 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:

$$v_1 = e_1 = N_1 \frac{d\Phi}{dt} \tag{21}$$

Es decir, en el régimen permanente de 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 grados con respecto a la tensión. En la Fig. 6 se muestran las ondas de tensión y de flujo durante el régimen permanente de la marcha en vacío.

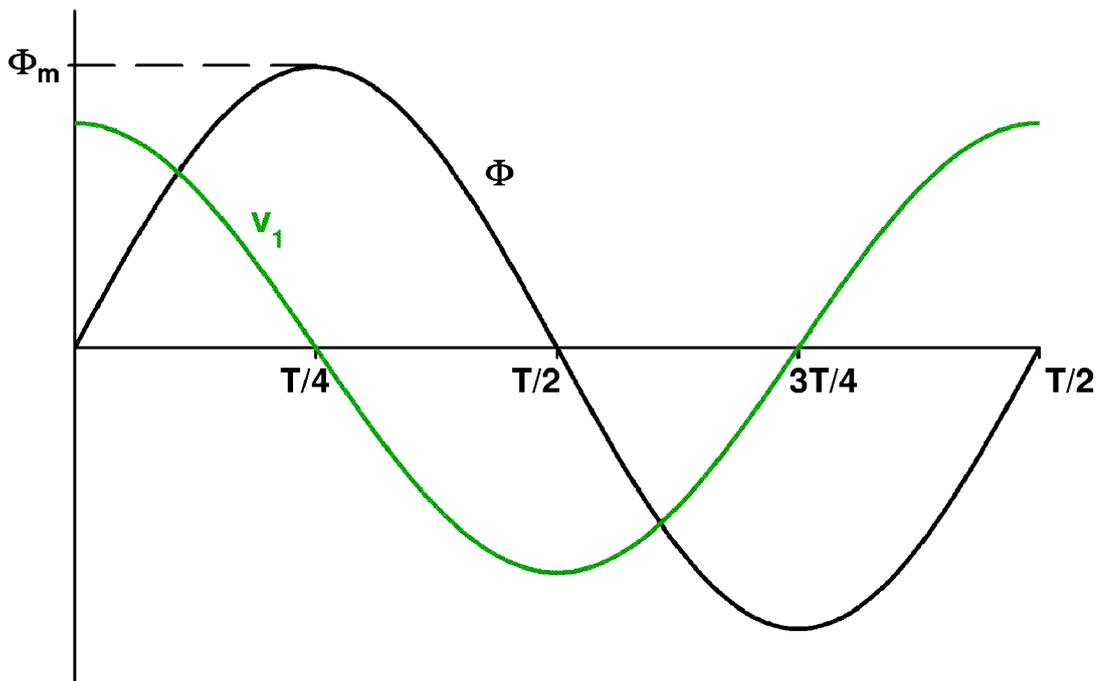


Fig. 6: Tensión y flujo durante el régimen permanente de la marcha de vacío

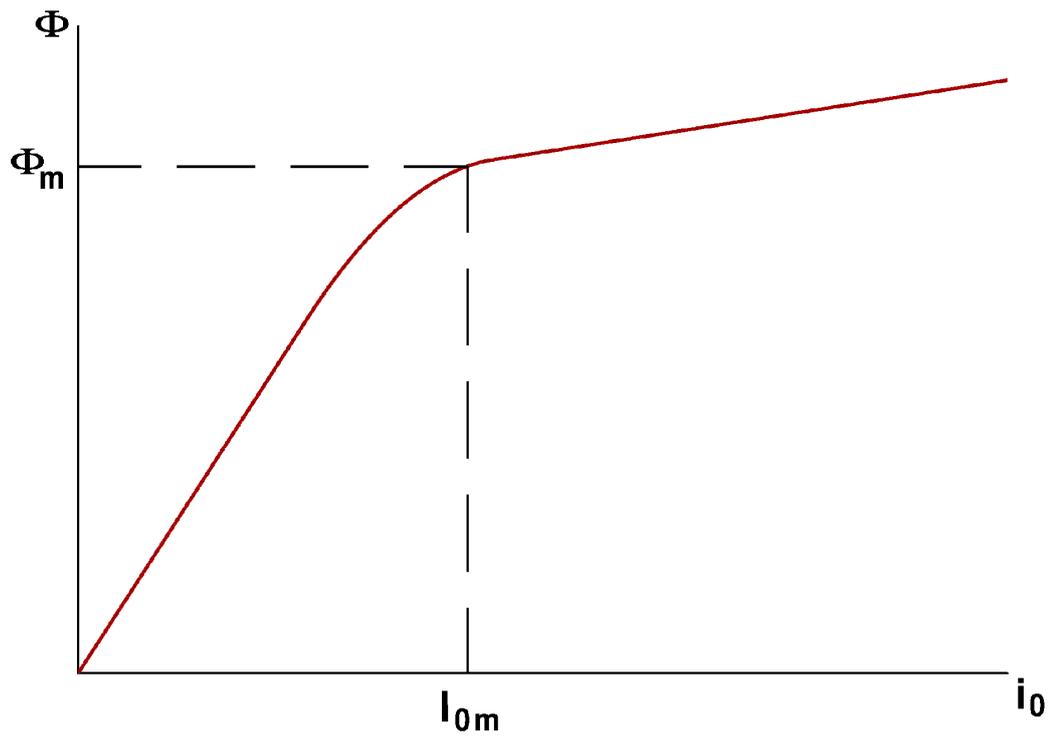


Fig. 7: Característica de vacío de un transformador

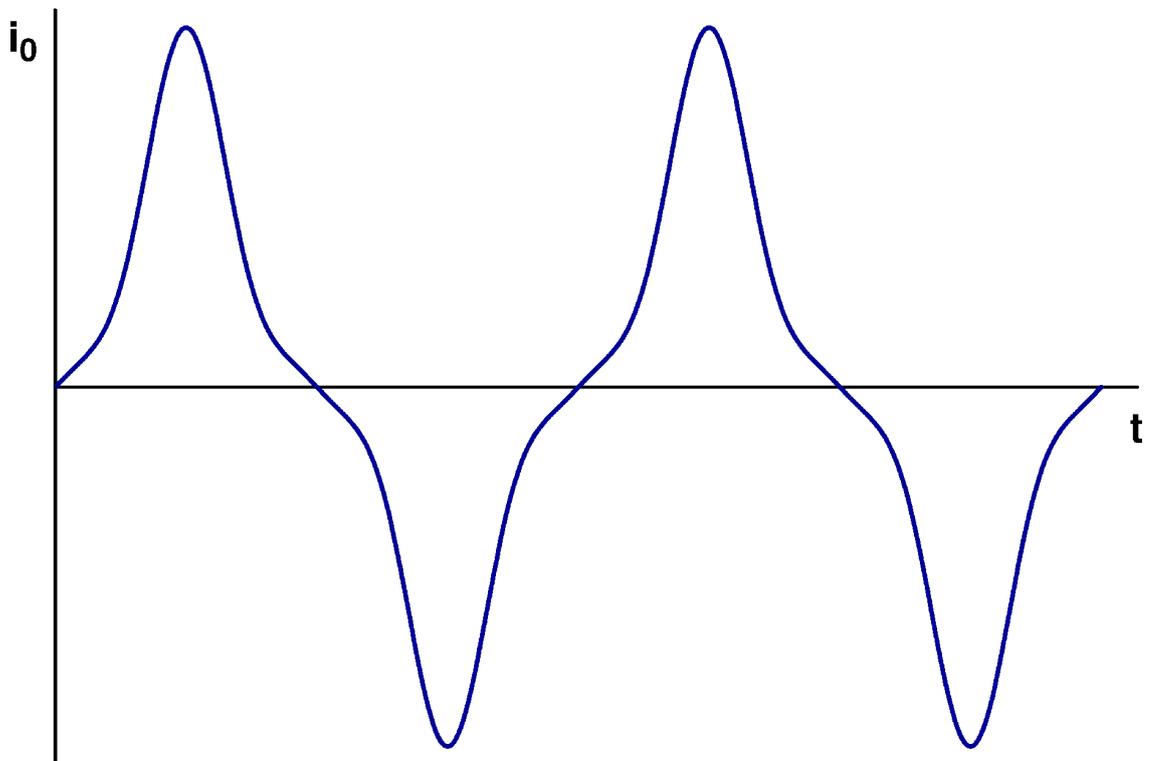


Fig. 8: Corriente de vacío en régimen permanente

Dado que la relación entre el flujo y la corriente de vacío está dada por la curva de magnetización o de vacío (Fig. 7), la cual no es una relación lineal; se obtiene que si el flujo en régimen permanente es una función sinusoidal (ver la Fig. 6) la corriente de vacío no lo es y tiene la forma representada en la Fig. 8.

Normalmente los transformadores se diseñan para que a la tensión asignada el núcleo magnético se encuentre en la zona del codo de la curva de magnetización, como se puede apreciar en la Fig. 7 donde se indican los valores máximos del flujo Φ_m y de la corriente I_{0m} del transformador en el régimen permanente de la marcha de vacío.

Ahora bien, es sabido que en un circuito inductivo el flujo no puede cambiar bruscamente de valor. Por lo tanto, si el transformador se encontraba previamente desconectado y con un flujo nulo en su circuito magnético y se conecta su primario a la tensión asignada en el instante $t = 0$; el flujo en los primeros instantes debe conservar su valor inicial nulo. Esto significa que el flujo tendrá que pasar por un régimen transitorio para cambiar su valor desde cero al correspondiente al régimen permanente de la marcha en vacío.

La evolución del flujo durante este régimen transitorio es muy similar a la de la corriente de cortocircuito estudiada en el capítulo anterior. Si en el momento de conectar el transformador coincidiera que la componente permanente del flujo tiene valor nulo (lo que equivale a que la tensión v_1 alcanza un máximo positivo o negativo (ver la Fig. 6)), no existirá el régimen transitorio y el flujo entrará directamente en el régimen permanente sin que se produzca ninguna discontinuidad en su valor antes y después de la conexión. Este caso es el representado en las Figs. 6 y 8. En las demás situaciones el flujo tendrá una componente transitoria Φ_{tran} que se amortigua exponencialmente y que se suma a la componente permanente Φ_{perm} .

El caso más desfavorable es cuando la conexión se realiza en el momento en que la componente permanente del flujo es máxima positiva o negativa, lo que significa que la tensión tiene un valor nulo en el momento de conectar el primario del transformador (ver la Fig. 9). En este caso, la componente transitoria debe tener un valor inicial igual al máximo (negativo o positivo) de la componente permanente para que el flujo total sea cero en el instante inicial. De modo análogo a como se explicó en el capítulo anterior para la corriente de choque, se obtiene que el valor máximo del flujo en este caso sucede aproximadamente para el instante $t = T/2$. Por otra parte, la componente transitoria del flujo tiene una constante de tiempo que es mucho mayor que la constante τ_{cc} de los cortocircuitos (ya que en ella interviene la reactancia magnetizante X_μ , que es mucho mayor que la reactancia de cortocircuito X_{cc}), y apenas se amortigua durante el primer semiperiodo. Esto indica que en este caso el flujo alcanza un valor máximo aproximadamente igual a 2 veces el flujo máximo Φ_m de régimen permanente (Fig. 9).

Como, además, existe el fenómeno de la histéresis, puede suceder que el transformador quede con un flujo remanente cuando se lo desconecta, el cual puede alcanzar valores de hasta la mitad del flujo máximo en régimen permanente ($\Phi_r \leq 0,5 \Phi_m$). Entonces, al volverlo a conectar a la red, el flujo inicial no será nulo, como se ha supuesto hasta ahora, sino que valdrá Φ_r . Teniendo esto en cuenta se deduce que, al conectar un transformador a la red, el flujo del transformador puede llegar a alcanzar un valor máximo igual a

$$2 \Phi_m + \Phi_r = 2,5 \Phi_m \quad (22)$$

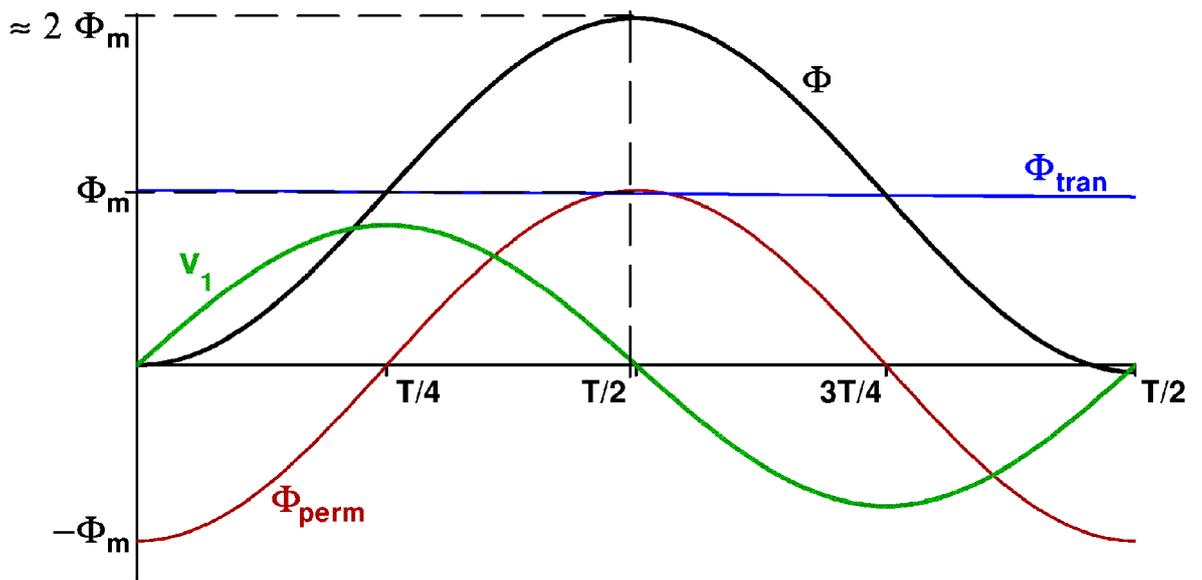


Fig. 9: Evolución del flujo al conectar un transformador en vacío en el momento más desfavorable (se ha supuesto que no existe flujo remanente)

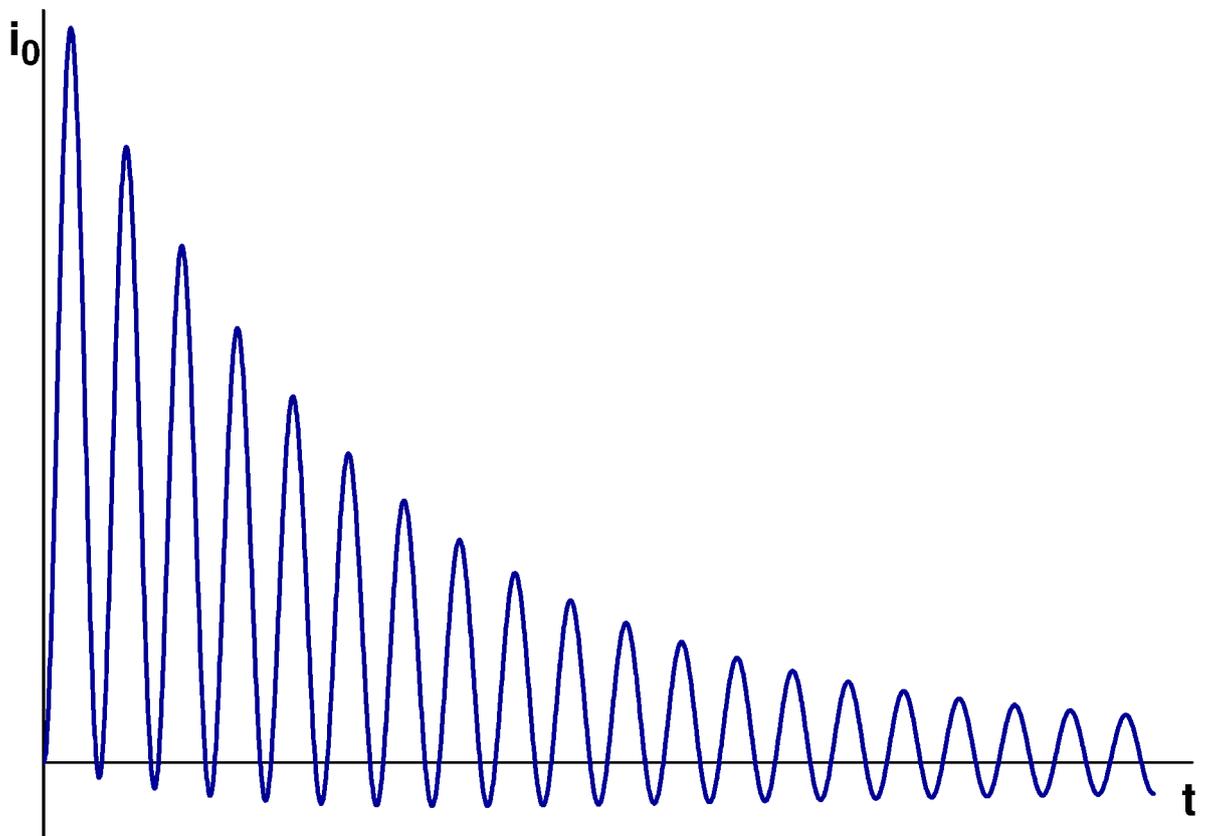


Fig. 10: Evolución de la corriente de conexión de un transformador en vacío en el caso más desfavorable

REGÍMENES TRANSITORIOS DE LOS TRANSFORMADORES

El hecho de que la relación entre el flujo y la corriente venga dada por la curva de vacío (Fig. 7), la cual es una relación no lineal, y de que el flujo Φ_m esté situado sobre el codo de saturación, indican que cuando el flujo alcance un valor de $2,5 \Phi_m$ la corriente será muchas veces mayor a la corriente máxima de vacío I_{0m} en régimen permanente.

En resumen, al conectar un transformador se produce un proceso transitorio donde el flujo puede llegar a valer hasta $2,5 \Phi_m$ y la corriente alcanzar valores muy superiores a I_0 , del orden de 100 veces I_0 ; es decir, de 5 a 8 veces la corriente asignada I_{1N} .

Sucede que la componente transitoria de la corriente tiene poca duración y enseguida desaparece quedando sólo su componente de régimen permanente, por lo que no existe peligro para la máquina (pues es la componente transitoria la que es elevada, mientras que la componente permanente es pequeña). Sin embargo, hay que tener en cuenta el valor máximo que puede alcanzar la corriente de conexión para el diseño de las protecciones del transformador y así evitar que éstas puedan actuar de forma intempestiva en el momento de conectarlo e impidan la realización de esta maniobra. Normalmente, las protecciones de corriente del transformador actúan con un cierto retraso para sobrecorrientes del orden de 5 a 8 veces la corriente asignada, con lo que dan tiempo a que la corriente de conexión se amortigüe sin que se produzca su actuación.

3.- SOBRETENSIONES**3.1.- Ondas de sobretensión**

En este capítulo se van a estudiar los efectos que tienen las sobretensiones sobre los transformadores.

Aunque cualquier aumento de la tensión sobre la máxima de servicio se puede denominar sobretensión, aquí se va a tratar de las sobretensiones que aparecen en forma de impulsos cortos y aislados. Las sobretensiones de este tipo se pueden producir por diversas causas: conexión y desconexión de interruptores, variaciones bruscas de carga, cortocircuitos, ...; pero las más peligrosas suelen ser las producidas por descargas atmosféricas, bien por caída directa de un rayo sobre una línea, o bien, por las tensiones inducidas por los rayos sobre las líneas.

Cuando un rayo cae sobre una línea aparecen dos ondas de sobretensión que circulan hacia ambos lados del punto de caída con una velocidad cercana a la de la luz. La forma de estas ondas viajeras presenta un frente escarpado, con una rápida subida hasta el valor máximo V_{m0} de la sobretensión, seguida de una bajada mucho más lenta de la tensión hasta los valores normales de servicio (véase la onda dibujada a la izquierda en la Fig. 11).

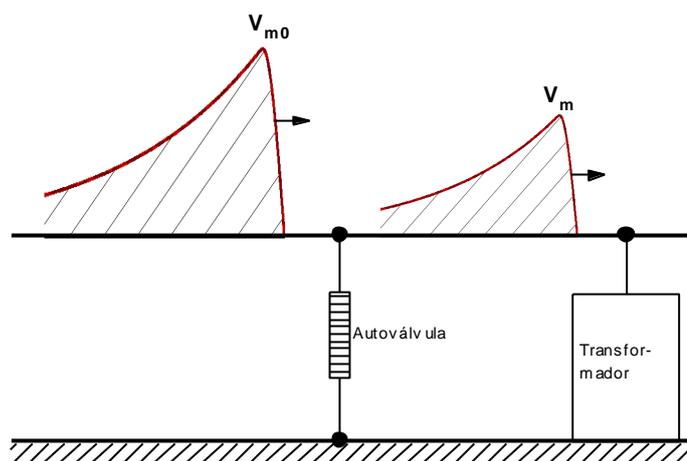


Fig. 11: Efecto de una autoválvula sobre una onda de sobretensión

Para proteger a las instalaciones del efecto de estas sobretensiones se utilizan descargadores y autoválvulas. En la Fig. 11 se muestra cómo una autoválvula limita el efecto de una onda de sobretensión sobre un transformador. Se coloca una autoválvula entre cada una de las fases de la línea y tierra. A la tensión normal de servicio la autoválvula se comporta como un circuito abierto y no pasa corriente por ella. Cuando la tensión supera un valor prefijado la autoválvula se vuelve conductora con lo que se descarga a tierra la mayor parte de la energía de la onda de sobretensión. Dicho de otra manera, al volverse conductora la autoválvula tiende a reducir la tensión de la línea con respecto a tierra. Cuando se acaba la sobretensión la autoválvula se desceba y se vuelve a convertir en aislante. De esta manera la onda de tensión que llega al transformador tiene un valor máximo V_m limitado por la autoválvula y que es menor que el de la onda original V_{m0} . Debido a fenómenos de reflexión de las ondas de sobretensión, las autoválvulas se deben situar cerca del elemento a proteger para que sean eficaces.

Por lo tanto, una vez que la onda de sobretensión ha quedado limitada por la autoválvula, el movimiento de esta onda hacia el transformador hace que el devanado que está conectado a la línea vea variar su tensión de la forma representada en la Fig. 12. La tensión del devanado aumenta rápidamente, en unos 1,2 μs , hasta el valor máximo V_m y luego disminuye lentamente, de forma que a los 50 μs se reduce hasta un valor igual a la mitad del máximo.

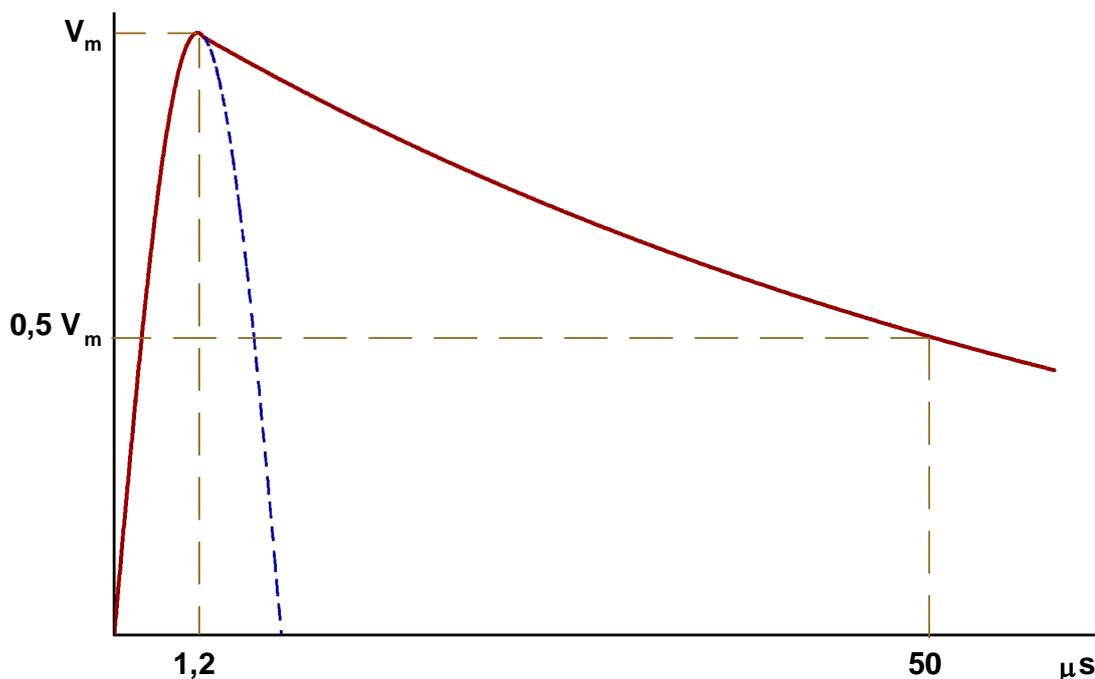


Fig. 12: Forma típica de la sobretensión producida por un rayo

Evidentemente habrá que diseñar el transformador para que sea capaz de resistir esta tensión sin que se deteriore.

3.2.- Efectos de las sobretensiones sobre un transformador

En este apartado se va a estudiar el caso de sobretensiones en un transformador con un solo devanado de alta tensión, cuyo borne A está conectado a la línea por donde le llega la sobretensión y el otro borne X (el neutro) está conectado a tierra o aislado. El estudio del comportamiento del transformador frente a estas sobretensiones es bastante complejo por lo que aquí sólo se dará una visión aproximada del mismo, suficiente para comprender los aspectos más esenciales de lo que sucede.

Durante los primeros momentos de la tensión de la Fig. 12, en los que ésta aumenta rápidamente de 0 a V_m , se puede considerar que sigue aproximadamente una ley sinusoidal (la cual continuaría según la línea de trazos dibujada en la Fig. 12), cuyo cuarto de período ($T/4$) se corresponde con el tiempo de 1,2 μs en que tarda en alcanzar el valor máximo. Es decir, durante los primeros 1,2 μs la sobretensión (Fig. 12) a la que se ve sometido el devanado de alta tensión del transformador es sinusoidal con una frecuencia:

$$f = \frac{1}{T} = \frac{1}{4(T/4)} = \frac{1}{4 \cdot 1,2 \cdot 10^{-6}} = 2,08 \cdot 10^5 \text{ Hz} \quad (23)$$

A frecuencias tan elevadas no se puede utilizar el circuito equivalente clásico del transformador que se ha venido empleando hasta ahora. En efecto, existen una serie de capacidades entre las bobinas del devanado y entre éstas y la tierra que a la frecuencia industrial (50 Hz) son totalmente despreciables, pero que a frecuencias altas dan lugar a unas reactancias lo suficientemente pequeñas como para que circulen por ellas corrientes apreciables y se deban tener en cuenta.

En la Fig. 13 se muestra el circuito equivalente del devanado de A.T. del transformador si se tienen en cuenta estas capacidades y se desprecia la resistencia del devanado. En este circuito equivalente L' son las inductancias de las bobinas del devanado, C'_d son las capacidades entre bobinas y C'_q son las capacidades entre las bobinas y las piezas conectadas a tierra.

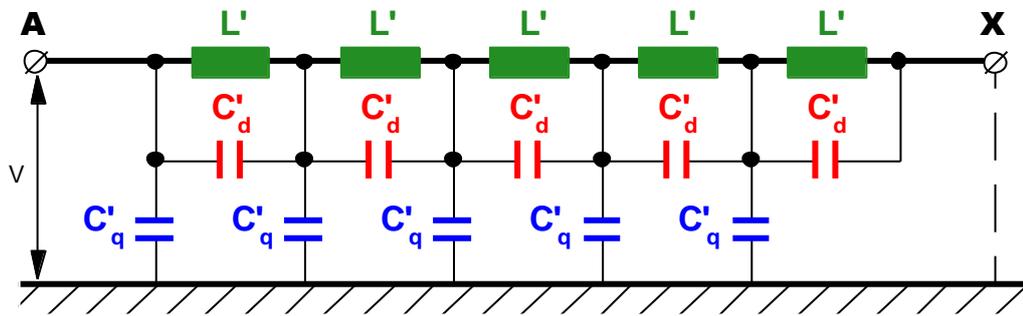


Fig. 13: Circuito equivalente de un devanado del transformador incluyendo sus capacidades y despreciando la resistencia

Si el número de bobinas del devanado es n , su capacidad longitudinal total C_d vale

$$C_d = \frac{1}{\sum \frac{1}{C'_d}} = \frac{C'_d}{n} \quad (24)$$

y la capacidad transversal total C_q vale

$$C_q = \sum C'_q = n C'_q \quad (25)$$

Se denominará α a este parámetro:

$$\alpha = \sqrt{\frac{C_q}{C_d}} = n \sqrt{\frac{C'_q}{C'_d}} \quad (26)$$

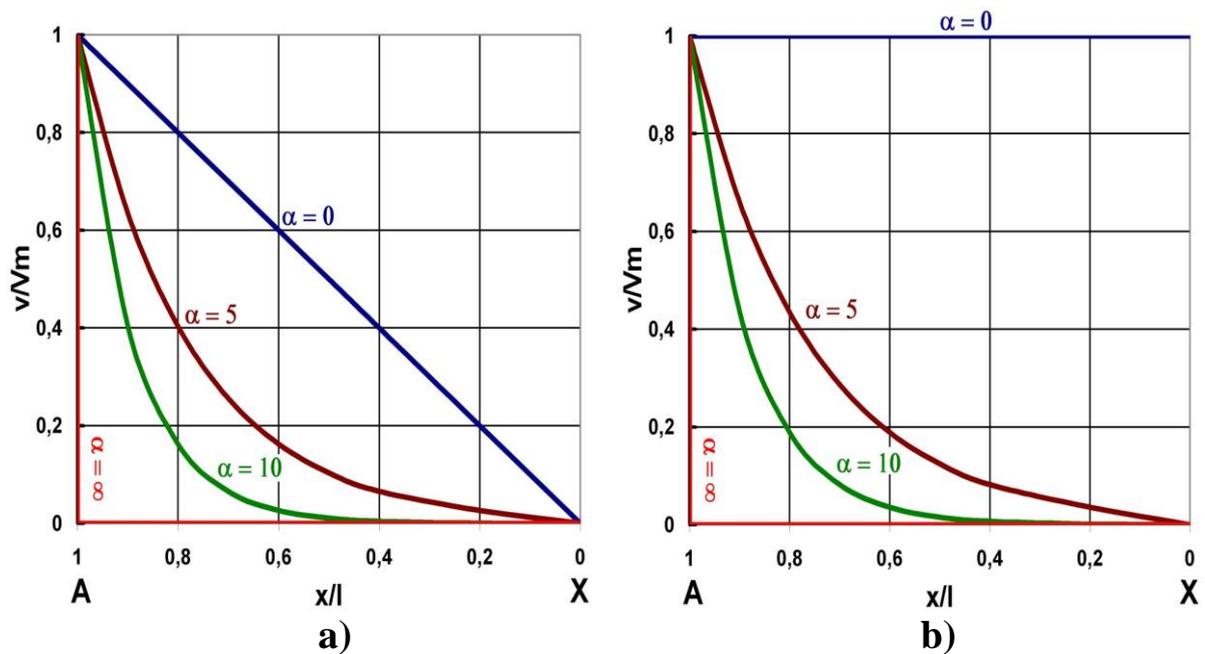
Supóngase que el neutro X está unido a tierra y que no existieran las capacidades de las bobinas respecto a tierra ($C'_q = 0$), lo cual significa que el parámetro α es nulo ($\alpha = 0$). Dado que para frecuencias altas las reactancias inductivas son muy elevadas y se pueden despreciar, se tiene que en este caso el bobinado de A.T. del transformador se comporta como un conjunto de capacidades iguales conectadas en serie entre la línea y tierra. Por consiguiente, circulará la misma corriente por todas las bobinas y se tiene una distribución uniforme de la

tensión. Esto está representado en la Fig. 14a donde en el eje vertical se indica la tensión y en el eje horizontal se indican los puntos del devanado de alta tensión desde el borne A (donde $x/l = 1$) hasta el borne X (donde $x/l = 0$).

Supóngase ahora que el neutro X sigue unido a tierra y que no existieran las capacidades entre bobinas ($C'd = 0$), lo cual significa que el parámetro α es infinito ($\alpha = \infty$). En este caso, la corriente circularía de la línea a tierra sólo a través de la primera bobina y toda la tensión que llega por la línea será soportada íntegramente por esta bobina. Esta situación se representa en la Fig. 4a mediante una línea que consta de dos tramos rectos, uno vertical y otro horizontal, que pasan por el punto A (por lo tanto, estos trazos coinciden con los ejes de coordenadas).

Para valores intermedios del parámetro α (entre cero e infinito) se obtienen distribuciones de la tensión comprendidas entre estos dos extremos (ver la Fig. 14a).

En la Fig. 14b se muestran cómo son las distribuciones de la tensión durante estos primeros $1,2 \mu s$ de la sobretensión para diferentes valores de α , cuando el neutro X del devanado de A.T. está aislado de tierra.



*Fig. 14: Distribución de la tensión en el instante inicial de la sobretensión:
 a: con el neutro unido a tierra
 b: con el neutro aislado de tierra*

Una vez pasados los primeros $1,2 \mu s$ la tensión varía muy lentamente, con lo cual el reparto de tensión a lo largo del devanado ahora es prácticamente similar al que se obtendría si se aplicara una tensión continua. Así, si el neutro X está unido a tierra la distribución final de la tensión da lugar a un reparto uniforme de ésta entre todas las bobinas del devanado; es decir, se obtiene una distribución similar a la correspondiente al periodo inicial cuando el parámetro α es nulo ($\alpha = 0$). Si el neutro X está aislado, al final todas las bobinas del devanado tienen el mismo potencial, lo cual también se corresponde a la distribución inicial que se obtiene cuando el parámetro α es nulo (véase la Fig. 14b).

REGÍMENES TRANSITORIOS DE LOS TRANSFORMADORES

Evidentemente, la transición entre la distribución de tensiones inicial (en los primeros 1,2 μ s) y la distribución final se produce a través de un proceso transitorio. Puesto que el circuito equivalente del devanado (Fig. 13) incluye capacidades e inductancias que forman un circuito oscilante, este transitorio incluirá oscilaciones que serán tanto más importantes cuanto más diferentes sean las distribuciones de tensión inicial y final. Por lo tanto, para minimizar los efectos peligrosos de estas oscilaciones y reducirlas todo lo posible interesa que las distribuciones de tensión inicial y final sean lo más similares posible. Es decir, conviene construir el devanado de forma que el parámetro α sea lo más pequeño posible.

Sin embargo, para reducir el valor del parámetro α ; es decir, para minimizar las capacidades a tierra C'_q , sería preciso aumentar mucho las distancias entre el devanado y las piezas conectadas a tierra, lo cual no resulta práctico.

Lo que se hace en los transformadores de tensiones inferiores a 110 kV es reforzar el aislamiento de las bobinas extremas que son las que, como se ha visto, soportan la mayor parte de las sobretensiones cuando el parámetro α no es pequeño. Para transformadores de tensiones iguales o superiores a 110 kV, además de reforzar el aislamiento de las bobinas extremas, se colocan unas pantallas electrostáticas que se conectan a la línea (borne A del devanado). Estas pantallas suelen tener la forma de anillos aislados abiertos (para que no se comporten como espiras en cortocircuito) que rodean el devanado. Mediante el empleo de estas pantallas se consigue que la distribución inicial de tensiones se aproxime a la correspondiente a un valor nulo del parámetro α ($\alpha = 0$).



UNIVERSIDAD DE CANTABRIA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA
ELÉCTRICA Y ENERGÉTICA



TRANSFORMADORES
TRIFÁSICOS
CON CARGAS
EQUILIBRADAS

Miguel Angel Rodríguez Pozueta

Doctor Ingeniero Industrial

TRANSFORMADORES TRIFÁSICOS CON CARGAS EQUILIBRADAS

En un sistema trifásico se puede realizar la transformación de tensiones mediante un banco de tres transformadores monofásicos idénticos (Fig. 21) o mediante un transformador trifásico, que puede ser de tres columnas (Fig. 22), de cinco columnas o, más raramente, acorazado.

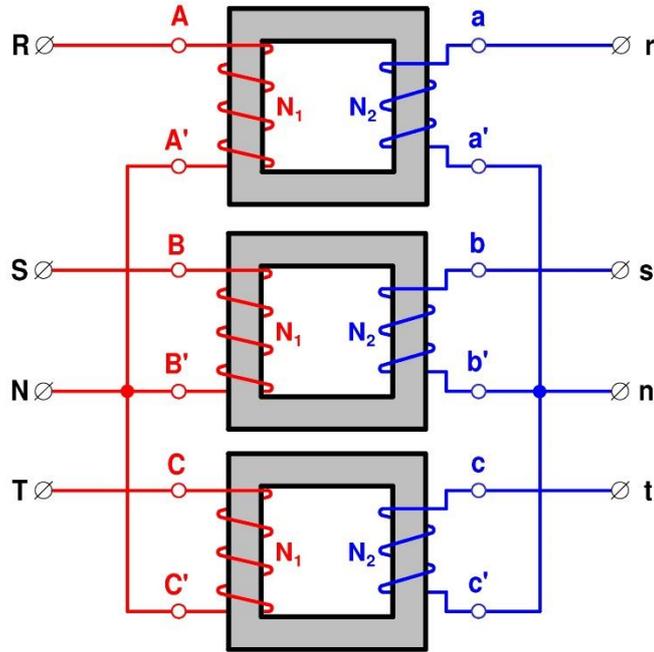


Fig. 21: Banco de tres transformadores monofásicos YNy

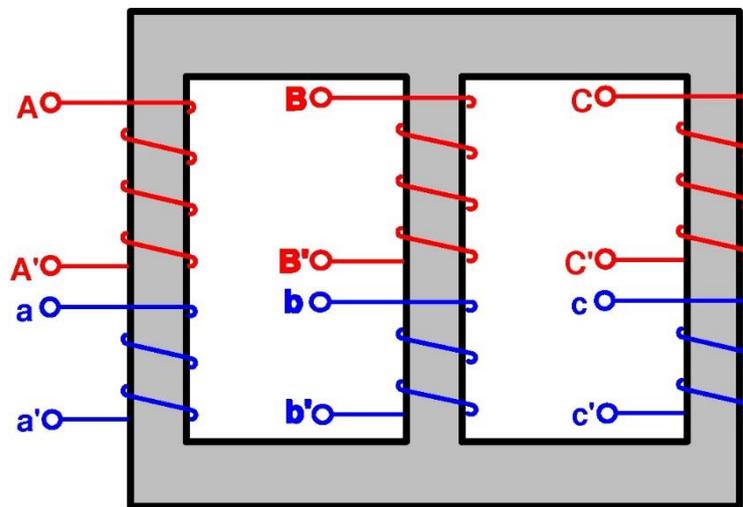


Fig. 22: Transformador trifásico de 3 columnas

Hay varias maneras de conectar entre sí las tres fases del primario, por un lado, y del secundario, por otro. Estas son: en **estrella** (con o sin hilo neutro) (véase la Fig. 23), **triángulo** (véase la Fig. 24) o **zig-zag** (con o sin hilo neutro) (véase la Fig. 25). En la conexión zig-zag cada una de las fases está dividida en dos mitades idénticas conectadas como se indica en la figura 25. Obsérvese en las figuras 23, 24 y 25 que hay dos formas diferentes de realizar cada uno de estos tres tipos de conexión.

TRANSFORMADORES TRIFÁSICOS CON CARGAS EQUILIBRADAS

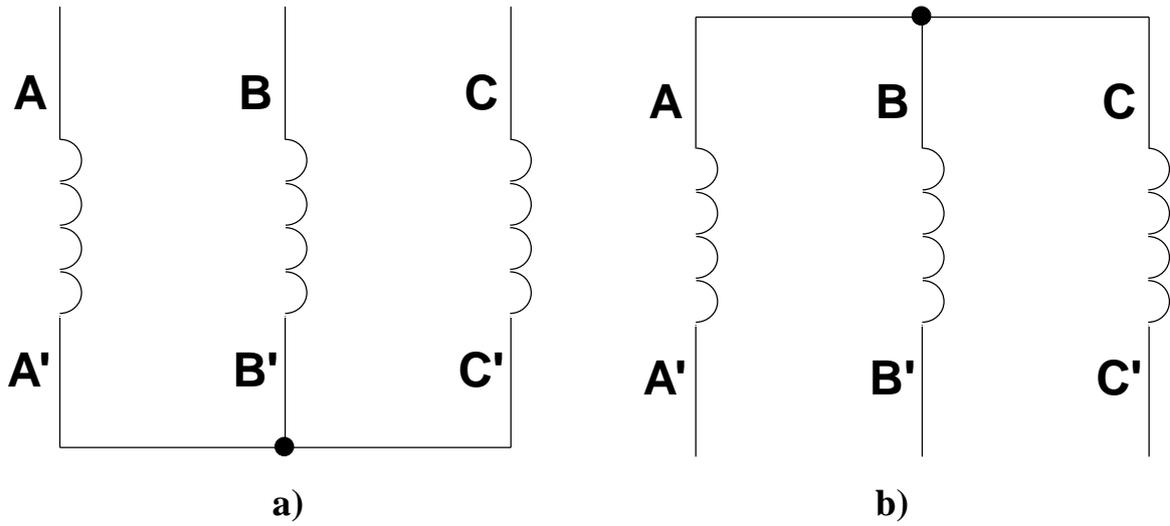


Fig. 23: Conexión estrella

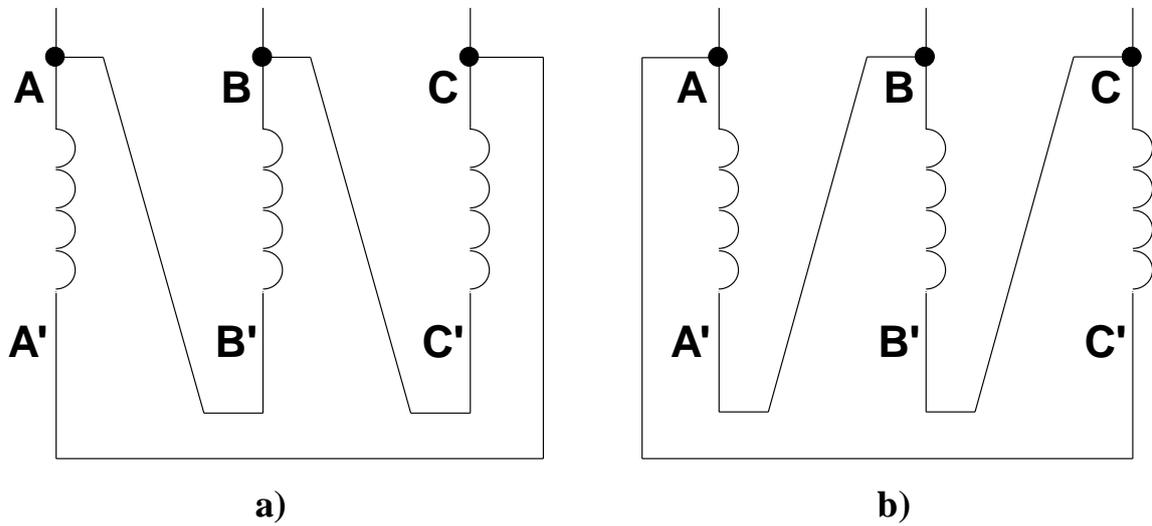


Fig. 24: Conexión triángulo

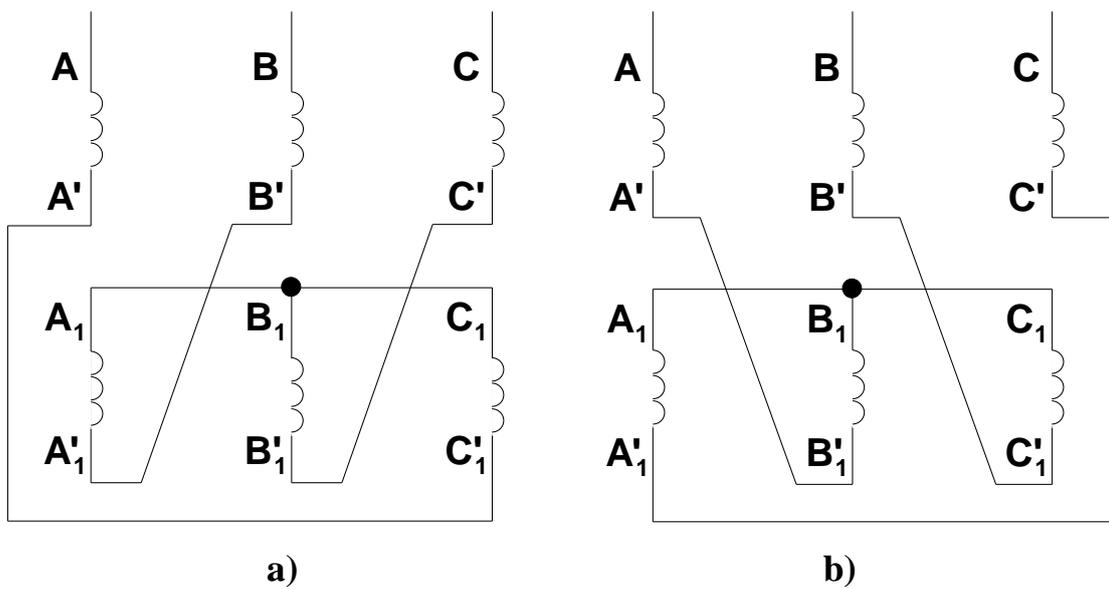


Fig. 25: Conexión zig-zag

TRANSFORMADORES TRIFÁSICOS CON CARGAS EQUILIBRADAS

La **designación de la forma de conexión** de un transformador se realiza por medio de dos letras y un número (por ejemplo, Yy0, Dy6, Yz11, ...). La primera letra es mayúscula e indica la forma de conexión del lado de alta tensión, la segunda letra es minúscula e indica la forma de conexión en el lado de baja tensión y el número indica el índice horario, el cual se definirá en este texto más adelante. Las letras que representan la forma de conexión son:

Y, y: Estrella.
D, d: Triángulo.
Z, z: Zig-Zag.

Si una estrella o un zig-zag tienen su neutro unido a la red se coloca la letra N o n después de las letras Y, y, Z o z, respectivamente.

Así un transformador YNd5 es un transformador estrella-triángulo con índice horario 5 en el que la estrella del lado de A.T. tiene su neutro unido a la red.

En un transformador o en un banco trifásico se pueden distinguir dos relaciones de transformación distintas: la relación de transformación m y la relación de transformación de tensiones m_T .

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

$$m = \frac{V_{1N}}{V_{2N}} = \frac{I_{2N}}{I_{1N}} = \frac{E_1}{E_2} = \frac{N_1}{N_2} \quad (53)$$

La **relación de transformación de tensiones m_T** es la que normalmente se proporciona como dato y es el cociente entre las tensiones asignadas de línea del primario y del secundario:

$$m_T = \frac{V_{1NL}}{V_{2NL}} = \frac{I_{2NL}}{I_{1NL}} \quad (54)$$

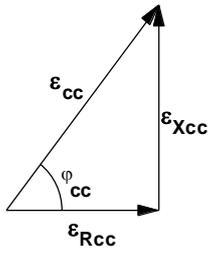
La relación que existe entre m y m_T depende de la forma de conexión del transformador o del banco trifásico.

Los diferentes tipos de transformadores trifásicos (de 3 o 5 columnas o acorazado) y un banco de tres transformadores monofásicos se comportan de igual manera cuando la carga está equilibrada. Sin embargo, el comportamiento de un transformador trifásico de tres columnas es diferente al de los demás tipos de transformaciones trifásicas frente a cargas desequilibradas.

Cada columna de un transformador trifásico se la puede considerar como un transformador monofásico. Así, cuando un banco o un transformador trifásico funcionan con cargas equilibradas, todos los transformadores monofásicos del banco o todas las columnas del transformador están igualmente cargados y bastará con estudiar uno solo de ellos mediante su circuito equivalente. Hay que tener en cuenta, entonces, que las tensiones y corrientes a utilizar en dicho circuito equivalente deberán ser las de fase del primario y del secundario y que la potencia de una fase es la tercera parte de la total.

De esta manera, todas las expresiones obtenidas anteriormente para el estudio de un transformador monofásico se pueden adaptar para el estudio de las transformaciones trifásicas con cargas equilibradas, tal como se indica seguidamente.

* **Tensiones relativas de cortocircuito:**



$$\begin{aligned}\varepsilon_{cc} &= \frac{V_{Icc}}{V_{1N}} \cdot 100 = \frac{V_{IccL}}{V_{1NL}} \cdot 100 = \frac{Z_{cc} \cdot I_{1N}}{V_{1N}} \cdot 100 \\ \varepsilon_{Rcc} &= \frac{R_{cc} \cdot I_{1N}}{V_{1N}} \cdot 100 = \frac{P_{cc}}{S_N} \cdot 100 = \varepsilon_{cc} \cdot \cos \varphi_{cc} \\ \varepsilon_{Xcc} &= \frac{X_{cc} \cdot I_{1N}}{V_{1N}} \cdot 100 = \sqrt{\varepsilon_{cc}^2 - \varepsilon_{Rcc}^2} = \varepsilon_{cc} \cdot \sin \varphi_{cc}\end{aligned}$$

* **Índice de carga:**

$$C = \frac{S}{S_N} \approx \frac{I_2}{I_{2N}} = \frac{I_{2L}}{I_{2NL}} = \frac{I'_2}{I'_{2N}} = \frac{I'_2}{I_{1N}} = \frac{I'_{2L}}{I_{1NL}} \approx \frac{I_1}{I_{1N}} = \frac{I_{1L}}{I_{1NL}}$$

* **Potencias y rendimiento:**

$$\begin{aligned}P_{Cu} &= C^2 \cdot P_{CuN} & P_{CuN} &= P_{cc} = S_N \cdot \frac{\varepsilon_{Rcc}}{100} \\ \eta &= \frac{P_2}{P_1} = \frac{P_2}{P_2 + P_{Fe} + P_{Cu}} = \frac{C \cdot S_N \cdot \cos \varphi_2}{C \cdot S_N \cdot \cos \varphi_2 + P_{Fe} + C^2 \cdot P_{CuN}}\end{aligned}$$

$$\eta = \eta_{Máx} \rightarrow P_v = P_f \rightarrow P_{Cu} = P_{Fe} \rightarrow C_{opt} = \sqrt{\frac{P_{Fe}}{P_{CuN}}} = \sqrt{\frac{P_0}{P_{cc}}}$$

* **Fallo o falta de cortocircuito:**

$$\begin{aligned}I_{1 \text{ falta}} &= I_{1N} \cdot \frac{100}{\varepsilon_{cc}} & I_{1 \text{ faltaL}} &= I_{1NL} \cdot \frac{100}{\varepsilon_{cc}} \\ I_{2 \text{ falta}} &= I_{2N} \cdot \frac{100}{\varepsilon_{cc}} & I_{2 \text{ faltaL}} &= I_{2NL} \cdot \frac{100}{\varepsilon_{cc}}\end{aligned}$$

* **Caídas de tensión:**

$$\begin{aligned}\frac{V_1 - V'_2}{V_{1N}} \cdot 100 &= \frac{V_{1L} - V'_{2L}}{V_{1NL}} \cdot 100 = \frac{V_1/m - V_2}{V_{2N}} \cdot 100 = \frac{V_{1L}/m_T - V_{2L}}{V_{2NL}} \cdot 100 = \\ &= C [(\varepsilon_{Rcc} \cdot \cos \varphi_2) \pm (\varepsilon_{Xcc} \cdot \sin \varphi_2)]\end{aligned}$$

Cargas inductivas: signo +

Cargas capacitivas: signo -

Regulación:

$$\begin{aligned}\varepsilon_C &= \frac{V_{20} - V_2}{V_{20}} \cdot 100 = \frac{V_{1N} - V'_2}{V_{1N}} \cdot 100 \\ \varepsilon_C &= \frac{V_{20L} - V_{2L}}{V_{20L}} \cdot 100 = \frac{V_{1NL} - V'_{2L}}{V_{1NL}} \cdot 100\end{aligned}$$

(V_{20L} = Tensión secundaria de línea en vacío = V_{2NL})

Ejemplo 1:

Un transformador trifásico Yy6 de 2000 kVA, 20000/6000 V y 50 Hz tiene estas tensiones relativas de cortocircuito: $\epsilon_{cc} = 7\%$ y $\epsilon_{Rcc} = 1,7\%$. Se sabe que en vacío esta máquina consume una potencia P_0 de 12,24 kW.

- a) Calcular las siguientes magnitudes de este transformador: ϵ_{Xcc} , P_{CuN} y P_{Fe} .
- b) Si se produce un cortocircuito trifásico en el secundario, ¿cuáles serán las corrientes de línea que circulan por el primario y por el secundario, respectivamente?
- c) Si este transformador está conectado a la tensión asignada en el primario y alimenta por el secundario a una carga de 1800 kVA con un factor de potencia 0,8 capacitivo, ¿cuál será la tensión de línea en el secundario?
- d) ¿Cuál es el rendimiento del transformador con la carga del apartado anterior?
- e) ¿Cuál es el mayor de los rendimientos máximos de este transformador?

Resumen de datos:

$S_N = 2000 \text{ kVA}$	$m_T = 20000/6000 \text{ V}$	$Yy6$
$\epsilon_{cc} = 7\%$	$\epsilon_{Rcc} = 1,7\%$	$P_0 = 12,24 \text{ kW}$
apartados c) y d) :	1800 kVA	$\cos \phi_2 = 0,8 \text{ capacitivo}$

Resolución:

Al tratarse de un transformador con la conexión Yy tanto el primario como el secundario están conectados en estrella. Por consiguiente, teniendo en cuenta la relación (55b), se cumplirá que:

$$\text{Primario (Estrella):} \left\{ \begin{array}{l} V_1 = \frac{V_{1L}}{\sqrt{3}} \\ I_1 = I_{1L} \end{array} \right. \quad \text{Secundario (Estrella):} \left\{ \begin{array}{l} V_2 = \frac{V_{2L}}{\sqrt{3}} \\ I_2 = I_{2L} \end{array} \right.$$

$$(i) \quad m = \frac{V_1}{V_2} = \frac{\frac{V_{1L}}{\sqrt{3}}}{\frac{V_{2L}}{\sqrt{3}}} = \frac{V_{1L}}{V_{2L}} = m_T$$

Antes de empezar a resolver el problema lo primero que hay que hacer es obtener las tensiones e intensidades asignadas del primario y del secundario, tanto de fase como de línea. Teniendo en cuenta las relaciones (i) se llega a:

$$V_{1NL} = 20000 \text{ V}$$

$$V_{2NL} = 6000 \text{ V}$$

$$I_{1NL} = \frac{S_N}{\sqrt{3} V_{1NL}} = \frac{2000000 \text{ VA}}{\sqrt{3} \cdot 20000 \text{ V}} = 57,7 \text{ A}$$

TRANSFORMADORES TRIFÁSICOS CON CARGAS EQUILIBRADAS

$$I_{2NL} = \frac{S_N}{\sqrt{3} V_{2NL}} = \frac{2000000 \text{ VA}}{\sqrt{3} \cdot 6000 \text{ V}} = 192 \text{ A}$$

$$V_{1N} = \frac{V_{1NL}}{\sqrt{3}} = \frac{20000}{\sqrt{3}} = 11547 \text{ V} \quad V_{2N} = \frac{V_{2NL}}{\sqrt{3}} = \frac{6000}{\sqrt{3}} = 3464 \text{ V}$$

$$I_{1N} = I_{1NL} = 57,7 \text{ A} \quad I_{2N} = I_{2NL} = 192 \text{ A}$$

a) De la Fig. 16 se deduce la relación (57c) que permite calcular el parámetro ε_{Xcc} :

$$\varepsilon_{Xcc} = \sqrt{\varepsilon_{cc}^2 - \varepsilon_{Rcc}^2} = \sqrt{7^2 - 1,7^2} = 6,79\%$$

Las pérdidas en el cobre asignadas P_{CuN} se pueden deducir a partir del parámetro ε_{Rcc} mediante las relaciones (57b) y (59):

$$P_{CuN} = S_N \cdot \frac{\varepsilon_{Rcc}}{100} = 2000 \cdot \frac{1,7}{100} = 34 \text{ kW} = 34000 \text{ W}$$

En el ensayo de vacío, las pérdidas en el cobre son despreciables y la potencia consumida es sólo la debida a las pérdidas en el hierro. Por lo tanto, se verifica la relación (43):

$$P_{Fe} = P_0 = 12,24 \text{ kW} = 12240 \text{ W}$$

Este transformador tiene estas magnitudes: $\varepsilon_{Xcc} = 6,79\%$, $P_{CuN} = 34000 \text{ W}$ y $P_{Fe} = 12240 \text{ W}$.

b) Las corrientes de cortocircuito de régimen permanente se pueden calcular aplicando la ley de Ohm al circuito de la Fig. 18 o mediante las expresiones (62):

$$I_{1 \text{ faltaL}} = I_{1NL} \cdot \frac{100}{\varepsilon_{cc}} = 57,7 \cdot \frac{100}{7} = 824 \text{ A}$$

$$I_{2 \text{ faltaL}} = I_{2NL} \cdot \frac{100}{\varepsilon_{cc}} = 192 \cdot \frac{100}{7} = 2743 \text{ A}$$

Las corrientes de línea que circulan por los devanados de este transformador durante el régimen permanente de la falta de cortocircuito son $I_{1 \text{ faltaL}} = 824 \text{ A}$ e $I_{2 \text{ faltaL}} = 2743 \text{ A}$.

c) El enunciado indica que la carga consume 1800 kVA. Como esta potencia está medida en kVA se trata de la potencia aparente S de la carga y, por lo tanto, el índice de carga C se puede calcular mediante el primer cociente que aparece en la expresión (58):

$$C = \frac{S}{S_N} = \frac{1800 \text{ kVA}}{2000 \text{ kVA}} = 0,9$$

El factor de potencia de la carga vale 0,8, luego:

$$\cos \varphi_2 = 0,8 \rightarrow \sin \varphi_2 = 0,6$$

TRANSFORMADORES TRIFÁSICOS CON CARGAS EQUILIBRADAS

Como esta carga es capacitiva, se usará el signo - en la expresión (63):

$$\varepsilon_c = 0,9 [(1,7 \cdot 0,8) - (6,79 \cdot 0,6)] = -2,44\%$$

Obsérvese que en este caso la regulación es negativa. Esto significa que la tensión secundaria es mayor en carga que en vacío. Cuando se tienen cargas capacitivas puede suceder que la tensión secundaria en carga aumente respecto a la de vacío. Este fenómeno es el Efecto Ferranti.

Teniendo en cuenta la relación (64b), se tiene que:

$$\varepsilon_c = \frac{V_{2NL} - V_{2L}}{V_{2NL}} \cdot 100 \rightarrow V_{2L} = V_{2NL} \left(1 - \frac{\varepsilon_c}{100}\right)$$
$$V_{2L} = V_{2NL} \left(1 - \frac{\varepsilon_c}{100}\right) = 6000 \cdot \left(1 - \frac{-2,44}{100}\right) = 6146 \text{ V}$$

La tensión de línea en bornes del secundario cuando el primario está a la tensión asignada y el transformador suministra 1800 kVA con factor de potencia 0,8 capacitivo es 6146 V.

d) El rendimiento de un transformador viene dado por la relación (60):

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{P_2}{P_2 + P_{Fe} + P_{Cu}} = \frac{C \cdot S_N \cdot \cos \varphi_2}{C \cdot S_N \cdot \cos \varphi_2 + P_{Fe} + C^2 \cdot P_{CuN}}$$

En esta expresión hay que tener cuidado de emplear las mismas unidades para todas las potencias.

En este caso se tiene que:

$$P_2 = S \cos \varphi_2 = 1800 \cdot 0,8 = 1440 \text{ kW} = 1440000 \text{ W}$$

$$P_{Cu} = C^2 \cdot P_{CuN} = 0,9^2 \cdot 34000 = 27540 \text{ W}$$

$$\eta = \frac{P_2}{P_2 + P_{Fe} + P_{Cu}} = \frac{1440000}{1440000 + 12240 + 27540} = 0,973 = 97,3\%$$

El rendimiento de este transformador con esta carga es de 97,3%.

e) En la figura 20 se han representado varias curvas en las que se aprecia cómo varía el rendimiento η en función del índice de carga C a factor de potencia constante. Se puede apreciar que hay un índice de carga C_{opt} con el cual, para un factor de potencia dado, el transformador funciona a su máximo rendimiento $\eta_{m\acute{a}x}$. Este índice de carga óptimo es común para todos los factores de potencia y se produce cuando las pérdidas variables igualan a las fijas (relación (61)):

TRANSFORMADORES TRIFÁSICOS CON CARGAS EQUILIBRADAS

$$C = C_{\text{opt}} \rightarrow P_v = P_f \rightarrow P_{\text{Cu}} = P_{\text{Fe}} \rightarrow C_{\text{opt}}^2 \cdot P_{\text{CuN}} = P_{\text{Fe}}$$

$$C_{\text{opt}} = \sqrt{\frac{P_{\text{Fe}}}{P_{\text{CuN}}}}$$

La potencia aparente a la cual se produce el máximo rendimiento es aquella que da lugar al índice de carga óptimo y se denomina $S_{\eta \text{máx}}$:

$$C_{\text{opt}} = \frac{S_{\eta \text{máx}}}{S_N} \rightarrow S_{\eta \text{máx}} = C_{\text{opt}} \cdot S_N$$

Aunque para todos los factores de potencia el rendimiento máximo se produce con el mismo índice de carga C_{opt} , en la figura 20 se puede apreciar que el rendimiento máximo $\eta_{\text{máx}}$ varía con el factor de potencia siendo mayor cuanto mayor es éste. Por lo tanto, el mayor de los rendimientos máximos se produce para factor de potencia unidad:

$$\text{Mayor } \eta_{\text{máx}} \rightarrow \cos \varphi_2 = 1$$

El rendimiento máximo se calcula mediante la relación (60) cuando en índice de carga es C_{opt} y se tiene que:

$$\eta_{\text{máx}} = \frac{C_{\text{opt}} \cdot S_N \cdot \cos \varphi_2}{C_{\text{opt}} \cdot S_N \cdot \cos \varphi_2 + P_{\text{Fe}} + C_{\text{opt}}^2 \cdot P_{\text{CuN}}} = \frac{S_{\eta \text{máx}} \cdot \cos \varphi_2}{S_{\eta \text{máx}} \cdot \cos \varphi_2 + 2 \cdot P_{\text{Fe}}}$$

En las expresiones anteriores hay que tener cuidado de utilizar las mismas unidades para todas las potencias.

En este transformador se obtiene que:

$$C_{\text{opt}} = \sqrt{\frac{P_{\text{Fe}}}{P_{\text{CuN}}}} = \sqrt{\frac{12240}{34000}} = 0,6$$

$$S_{\eta \text{máx}} = C_{\text{opt}} \cdot S_N = 0,6 \cdot 2000 \text{ kVA} = 1200 \text{ kVA} = 1200000 \text{ VA}$$

Luego, el rendimiento máximo para factor de potencia unidad (el mayor de los rendimientos máximos) vale:

$$\eta_{\text{máx}} = \frac{S_{\eta \text{máx}} \cdot \cos \varphi_2}{S_{\eta \text{máx}} \cdot \cos \varphi_2 + 2 \cdot P_{\text{Fe}}} = \frac{1200 \cdot 1}{1200 \cdot 1 + 2 \cdot 12,24} = 0,98 = 98\%$$

En la fórmula anterior todas las potencias se han medido en kW o kVA.

El mayor de los rendimientos máximos de este transformador vale 98%.

DESIGNACIÓN DE TERMINALES

Según la norma CEI 76-4, la designación de los terminales del primario y del secundario de un transformador trifásico o de un banco de tres transformadores monofásicos es así (véanse las Figs. 21 y 22):

- Se denominan con letras mayúsculas (A, B, C, A', B', C') los terminales del lado de alta tensión y con letras minúsculas (a, b, c, a', b', c') los del lado de baja tensión.
- Los dos terminales de la misma bobina están designados con la misma letra, aunque uno de ellos se denomina con la letra con apóstrofe (a y a', A y A', b y b', ...).
- Dos terminales, uno del primario y otro del secundario, sometidos a tensiones que están prácticamente en fase (recuérdese que en un transformador monofásico las tensiones primaria y secundaria están casi en fase) se designan con la misma letra, uno con mayúscula y otro con minúscula (a y A, a' y A', b y B, b' y B', ...).

La designación de los terminales de un transformador descrita anteriormente ha sido modificada de forma importante por la norma UNE 20158.

Según esta norma los extremos y las tomas de los devanados de un transformador se designan mediante tres caracteres (véanse las Figs. 26a, 26b y 26c):

- El primer carácter es una cifra que indica si el arrollamiento es de alta o baja tensión. El 1 se usa para A.T. y el 2 para B.T. Si hay más arrollamientos se usarán las cifras 3, 4, 5, etc. en orden decreciente de tensión.
- El segundo carácter es una letra (preferentemente mayúscula) que indica las fases de un arrollamiento. Se usan las letras U, V y W para las fases y, si es preciso, el neutro se marca con la letra N. (En los transformadores monofásicos no se incluye esta letra y se sustituye por un punto para separar los otros dos caracteres, que son cifras).
- El tercer carácter es una cifra que indica los extremos y las tomas de los arrollamientos de fase. Los extremos de las fases se marcan con las cifras 1 y 2. Las tomas intermedias se señalan con las cifras 3, 4, 5, etc. empezando por la toma más cercana al extremo designado con un "1".

En un transformador *monofásico* los bornes accesibles desde el exterior corresponden a los dos extremos de cada devanado. Por lo tanto, se designan de igual manera que estos extremos que, como se ha indicado más arriba, es mediante dos cifras separadas por un punto (Figs. 26b y 26c).

En un *autotransformador monofásico* (Fig. 26d) el borne común se designa con un "2". Este borne es a la vez el 1.2 y el 2.2. Los otros bornes se denominan 1.1 (A.T.) y 2.1 (B.T.).

Los bornes que son accesibles en la cuba de un transformador *trifásico* normalmente no se corresponden con los dos extremos de todas las fases de los lados de A.T. y B.T. Las conexiones entre las fases se realizan en el interior y en el exterior sólo son accesibles los bornes de línea de las tres fases de cada lado y, en su caso, el neutro. Por lo tanto, los bornes de un transformador trifásico se indican con sólo los dos primeros caracteres, usando la letra N para el neutro cuando sea preciso. En las Figs. 26f y 26g se indica la nomenclatura de los extremos de las fases de los devanados de un transformador trifásico.

TRANSFORMADORES TRIFÁSICOS CON CARGAS EQUILIBRADAS

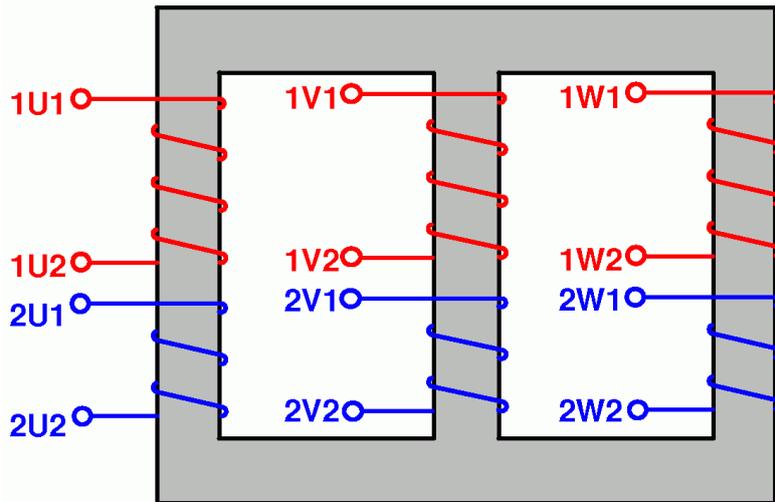


Fig. 26a: Marcado de los extremos de los devanados de un transformador trifásico (UNE 20158)

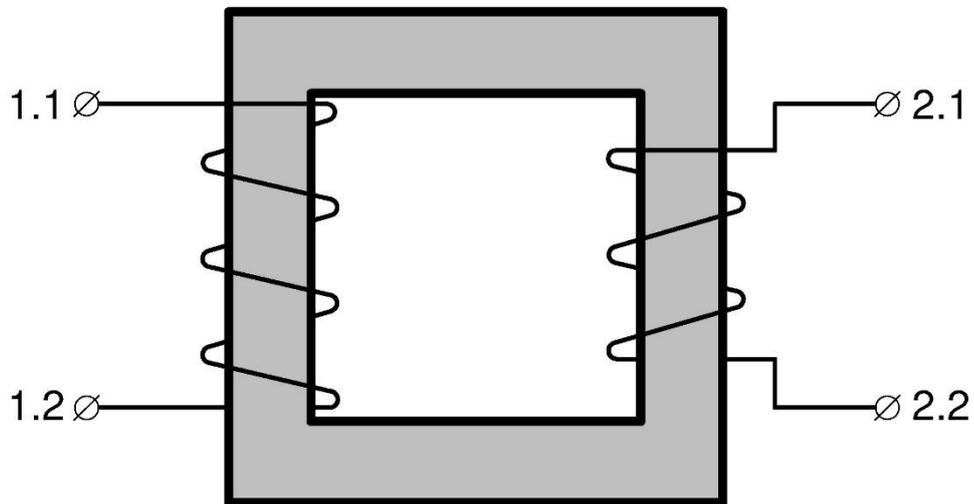


Fig. 26b: Marcado de los terminales de un transformador monofásico (UNE 20158)

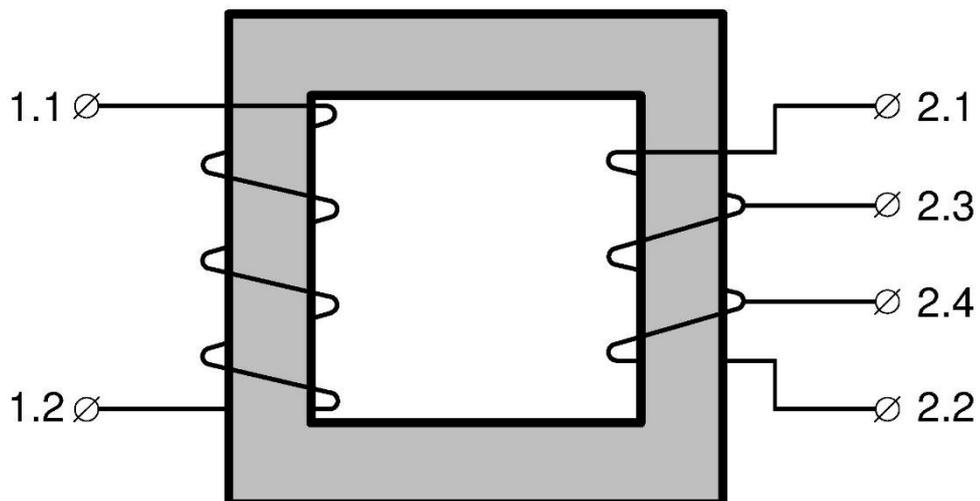


Fig. 26c: Marcado de los terminales de un transformador monofásico con tomas intermedias en el devanado de B.T. (UNE 20158)

TRANSFORMADORES TRIFÁSICOS CON CARGAS EQUILIBRADAS

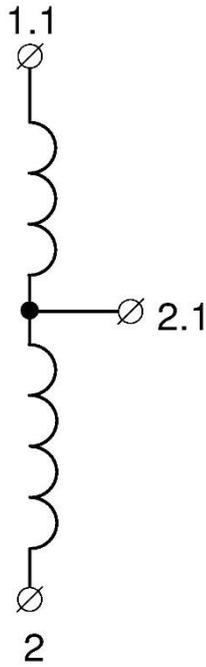


Fig. 26d: Marcado de un autotransformador monofásico (UNE 20158)

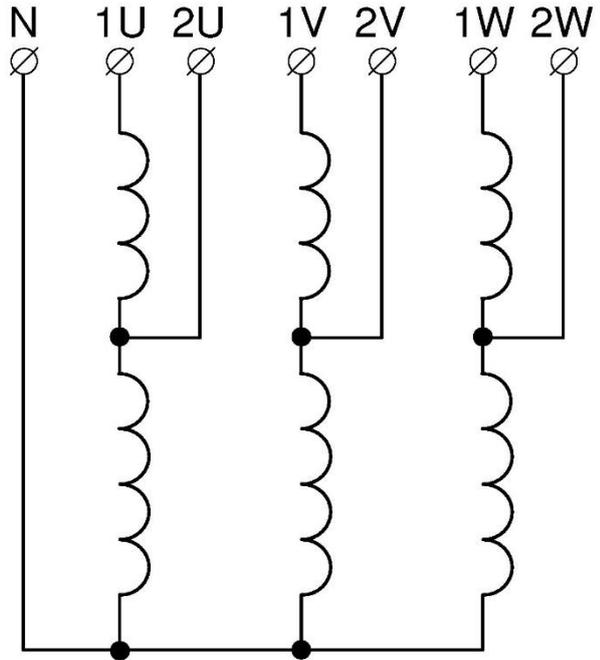


Fig. 26e: Marcado de un autotransformador trifásico (UNE 20158)

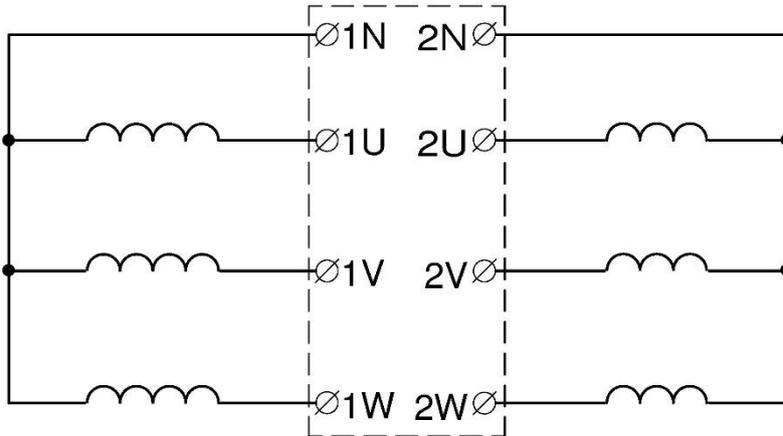


Fig. 26f: Marcado de los bornes accesibles desde el exterior de un transformador trifásico Yy (UNE 20158)

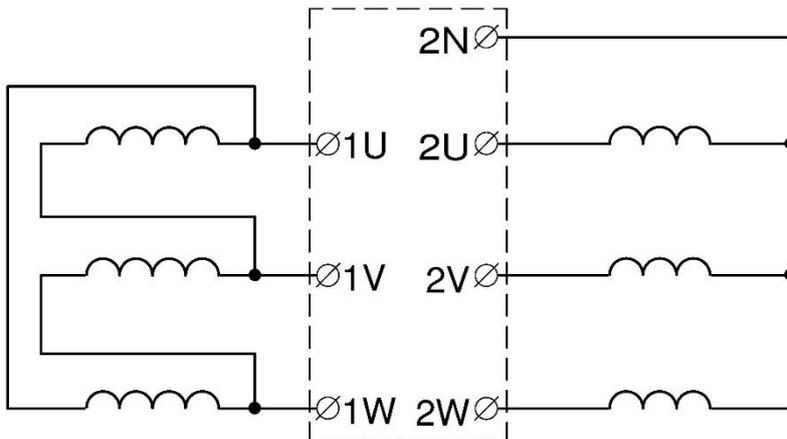


Fig. 26g: Marcado de los bornes accesibles desde el exterior de un transformador trifásico Dy (UNE 20158)

TRANSFORMADORES TRIFÁSICOS CON CARGAS EQUILIBRADAS

En un *autotransformador trifásico* (Fig. 26e) el borne común se designa con una “N”. Este borne es a la vez el 1N y el 2N. Los otros bornes son 1U, 1V y 1W en el lado de A.T. (Alta Tensión) y 2U, 2V y 2W en el lado de B.T. (Baja Tensión).

De acuerdo con todo lo anterior, la correspondencia entre la designación de los extremos de las fases según la nomenclatura CEI 76-4 y la correspondiente a la norma UNE 20158 es la indicada en la Tabla I (véanse las Figs. 22 y 26a).

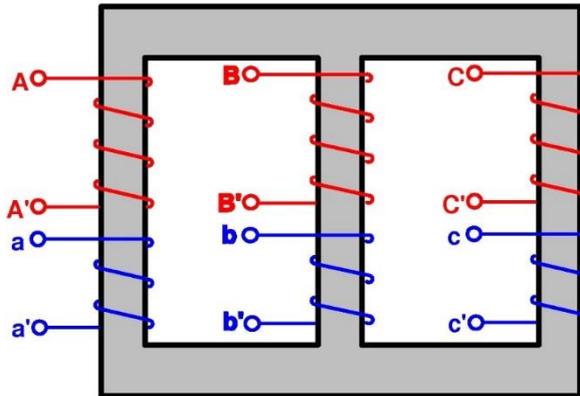


Fig. 22: Denominación según CEI 76-4

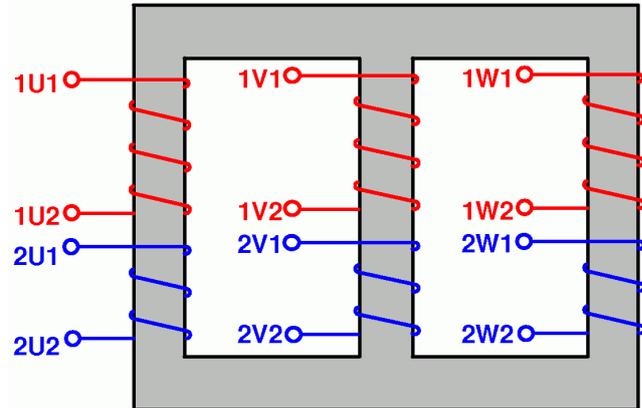


Fig. 26a: Denominación según UNE 20158

Tabla I: designación de terminales de un transformador

Designación	Alta Tensión (A.T.)						Baja Tensión (B.T.)					
	Fase R		Fase S		Fase T		Fase R		Fase S		Fase T	
CEI 76-4	A	A'	B	B'	C	C'	a	a'	b	b'	c	c'
UNE 20158	1U1	1U2	1V1	1V2	1W1	1W2	2U1	2U2	2V1	2V2	2W1	2W2

ÍNDICE HORARIO

El índice horario señala el desfase entre tensiones homólogas del primario y del secundario de un transformador trifásico.

Las tensiones primaria y secundaria de una misma fase se las puede considerar en fase entre sí. Sin embargo, las tensiones de línea entre fases similares del primario y del secundario o las tensiones fase-neutro para fases similares primaria y secundaria pueden estar desfasadas entre sí. Téngase en cuenta, por ejemplo, que en la conexión triángulo las tensiones de línea y de fase coinciden mientras que en una estrella las tensiones de línea forman 30° con respecto a las de fase (que son iguales a las tensiones fase-neutro). Así pues, en un transformador estrella-triángulo (véase el ejemplo que se indica más abajo) se tiene que una tensión fase-neutro (que es la tensión de fase en estrella) del primario está en fase con una tensión de línea (que es la tensión de fase en un triángulo) del secundario y, en consecuencia, las tensiones de línea del primario y del secundario están desfasadas 30° .

Según el tipo de conexiones que se adopte en un transformador o en un banco de transformadores trifásico se pueden conseguir diferentes ángulos de desfase entre las tensiones homólogas del primario y del secundario. Este ángulo de desfase, medido en múltiplos de 30° y en el sentido de las agujas del reloj desde la tensión mayor a la tensión menor, es el **índice horario** del transformador.

Ejemplo 2: Conexión Yd5

En el transformador trifásico de la figura 27:

- a) Determine el índice horario.
- b) Indique la forma de conexión según la nomenclatura normalizada.
- c) Calcule la relación entre las relaciones de transformación de tensiones m_T y la relación de transformación m (suponga que el primario es el lado de A.T.).

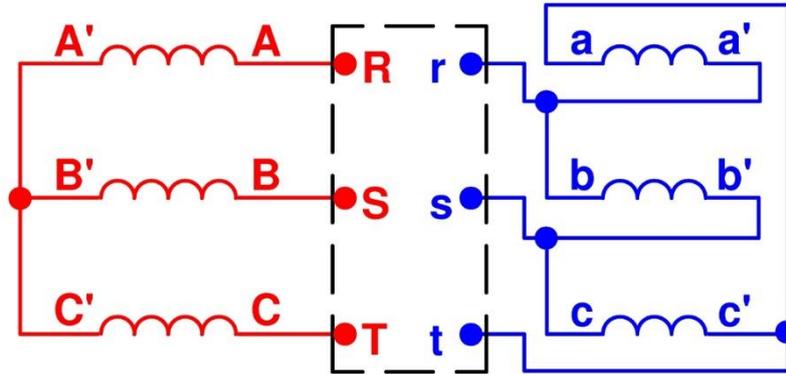


Fig. 27: Esquema de conexiones del transformador

Resolución:

- a) Es sabido que en un sistema trifásico las tensiones de línea forman un triángulo equilátero, cuyos vértices se corresponden con las tres fases de la red (Fig. 28). El centro de este triángulo representa el neutro. De esta forma las tensiones fase-neutro van desde el centro de este triángulo hasta sus vértices (Figs. 28 y 31).

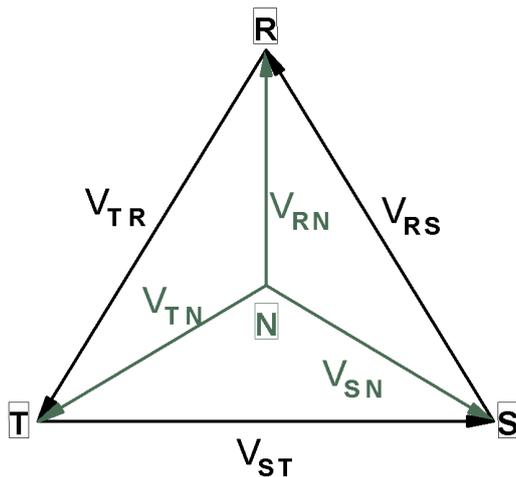


Fig. 28: Diagrama fasorial de tensiones de un sistema trifásico equilibrado

En el caso del transformador que nos ocupa, el devanado de A.T. está conectado en estrella, por lo que las tensiones de fase son iguales las tensiones fase-neutro de la red a la que está conectado. Tal como están realizadas las conexiones del transformador (Fig. 27) se tiene que los terminales A', B' y C' están a la tensión del neutro de la red de A.T. y los terminales A, B y C están conectados a las fases de esta red. Por lo tanto, de las Figs. 27 y 28 se deduce el diagrama fasorial del bobinado de A.T. representado en la Fig. 29a.

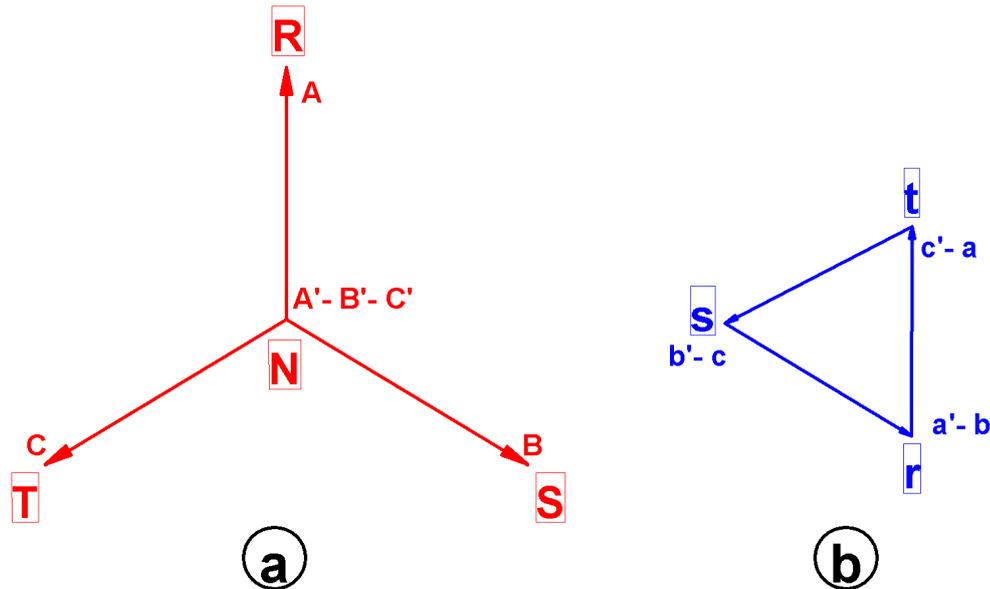


Fig. 29: Diagramas fasoriales de los devanados de A.T. (a) y de B.T. (b) del transformador

A continuación, se dibuja el diagrama fasorial del arrollamiento de B.T. teniendo en cuenta que las tensiones $V_{aa'}$, $V_{bb'}$ y $V_{cc'}$ están en fase, respectivamente, con $V_{AA'}$, $V_{BB'}$ y $V_{CC'}$ y que, dada la conexión triángulo de este devanado, estas tensiones son de línea y forman, por lo tanto, un triángulo equilátero. Además, según se aprecia en la Fig. 27, los terminales a y c' están a igual tensión y lo mismo sucede con los terminales b y a' y con c y b', respectivamente. También se tiene que, según la Fig. 27, las fases r, s y t de la red del lado de B.T. se corresponden, respectivamente, con los terminales a', b' y c' del transformador. Con todo ello se obtiene el diagrama fasorial del bobinado de B.T. representado en la Fig. 29b.

Si se dibujan superpuestos los diagramas fasoriales del devanado de A.T. (Fig. 29a) y del devanado de B.T. (Fig. 29b) de forma que los centros de ambos diagramas coincidan se obtiene el diagrama fasorial de la Fig. 30.

Teniendo en cuenta que la tensión fase-neutro V_m del lado de B.T. es igual a la tensión entre el terminal a' (a la tensión de la fase r de la red) y el neutro de la red de B.T. (centro del triángulo de tensiones de línea del lado de B.T.), se observa en la Fig. 30 que el desfase entre las tensiones homólogas fase-neutro V_{RN} del lado de A.T. y V_m del lado de B.T. (ángulo de desfase medido desde la tensión de A.T. a la de B.T. siguiendo el sentido de las agujas del reloj) es de 150° . Dividiendo este ángulo entre 30° , se obtiene que el índice horario de este transformador es 5.

Otra forma de obtener el índice horario a partir de la Fig. 30 es asimilar los fasores que representan a las tensiones fase-neutro V_{RN} y V_m como las agujas de un reloj. La aguja larga es la correspondiente a la tensión de A.T. y la corta es la que se corresponde con la tensión de B.T. La hora que indican entonces estas agujas es el índice horario del transformador.

Por lo tanto, el índice horario de este transformador es 5.

TRANSFORMADORES TRIFÁSICOS CON CARGAS EQUILIBRADAS

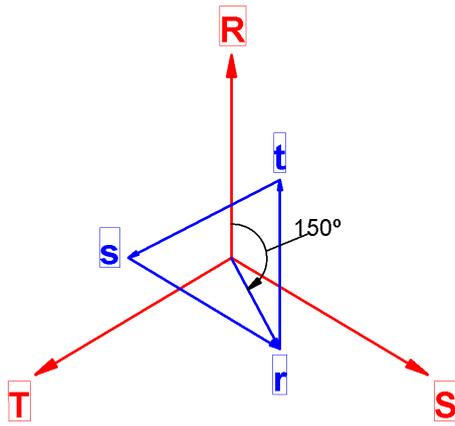


Fig. 30: Diagrama fasorial conjunto de ambos devanados del transformador

- b) En este caso el devanado de A.T. está conectado en estrella, el de B.T. en triángulo y el índice horario es 5. Luego, la designación normalizada de este transformador es Yd5.
- c) Al tratarse de un transformador con la conexión Yd y estar alimentado por el lado de A.T., el primario está conectado en estrella y el secundario en triángulo. Por consiguiente, se cumplirá que:

$$\text{Primario (Estrella): } V_{1L} = \sqrt{3} \cdot V_1 \quad \text{Secundario (Triángulo): } V_2 = V_{2L}$$

Luego, se tiene que:

$$m_T = \frac{V_{1L}}{V_{2L}} = \frac{\sqrt{3} V_1}{V_2} = \sqrt{3} \cdot \frac{V_1}{V_2} = \sqrt{3} \cdot \frac{N_1}{N_2} = \sqrt{3} \cdot m$$

$$m = \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot m_T$$

En consecuencia, la relación de transformación m de este transformador se obtiene dividiendo la relación de transformación de tensiones m_T entre $\sqrt{3}$.

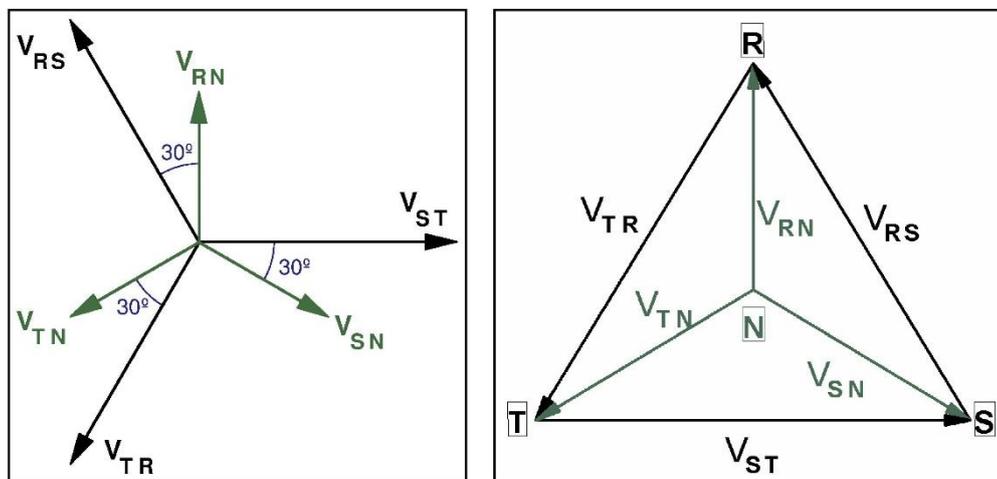
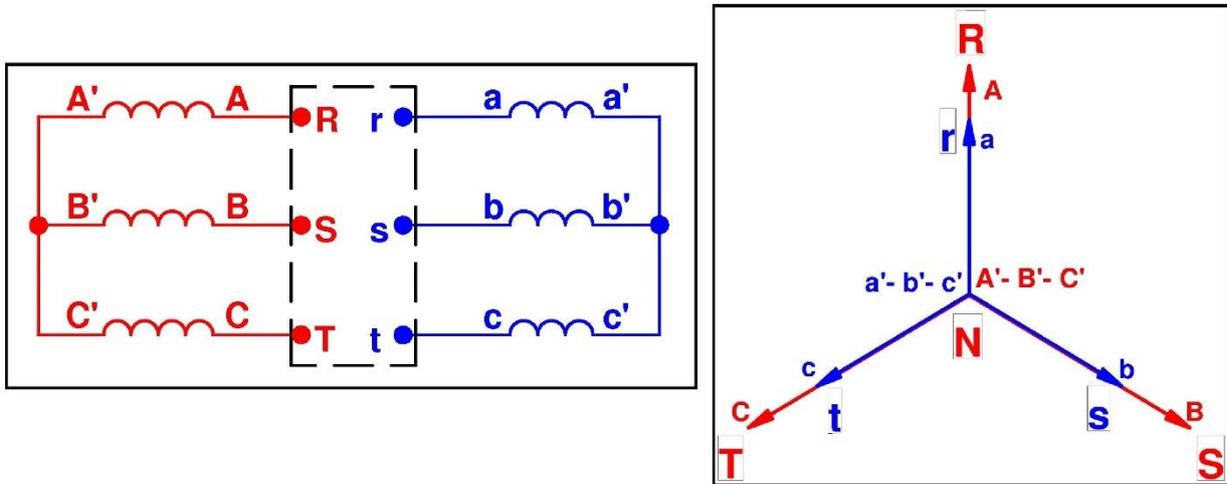


Fig. 31: Dos formas de representar el diagrama fasorial de un sistema de tensiones trifásico equilibrado

Conexión Yy0

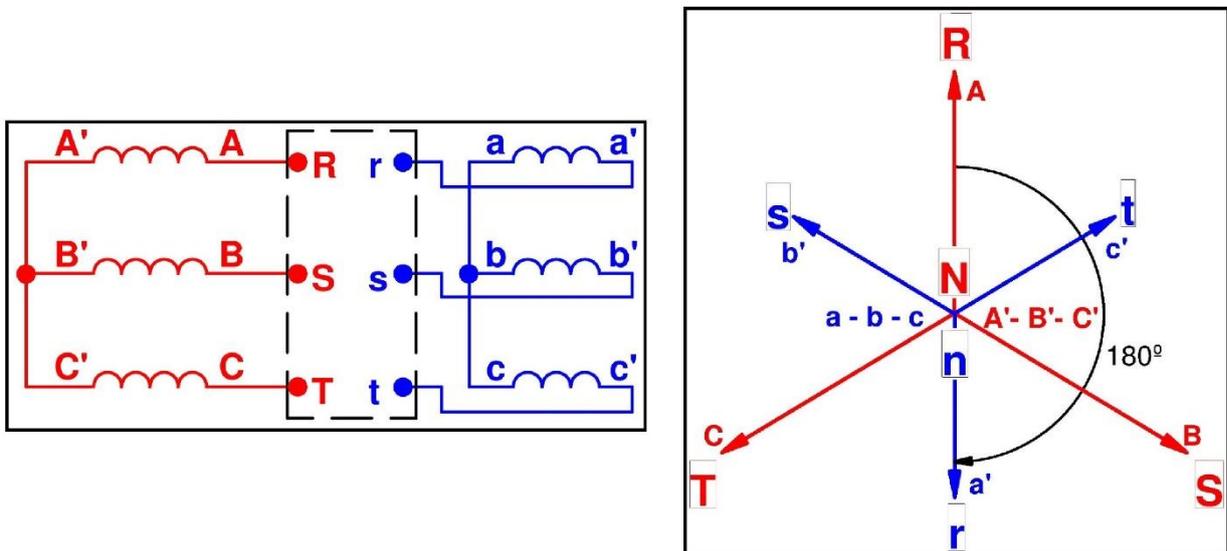


$$m_T = \frac{V_{1L}}{V_{2L}} = \frac{\sqrt{3} V_1}{\sqrt{3} V_2} = \frac{N_1}{N_2} = m$$

$$m = m_T$$

Fig. 32: Diagrama fasorial y relaciones de transformación de un transformador Yy0

Conexión Yy6



$$m_T = \frac{V_{1L}}{V_{2L}} = \frac{\sqrt{3} V_1}{\sqrt{3} V_2} = \frac{N_1}{N_2} = m$$

$$m = m_T$$

Fig. 33: Diagrama fasorial y relaciones de transformación de un transformador Yy6

Conexión Dy11

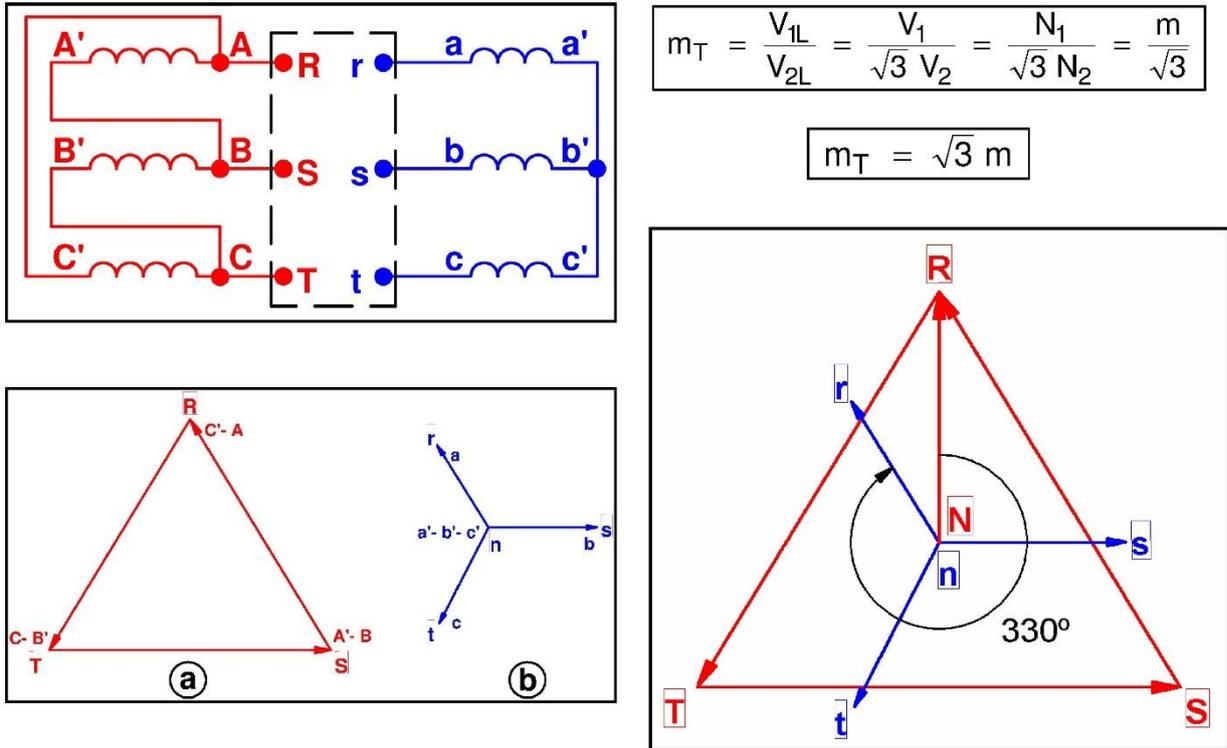


Fig. 34: Diagrama fasorial y relaciones de transformación de un transformador Dy11

Conexión Dd0

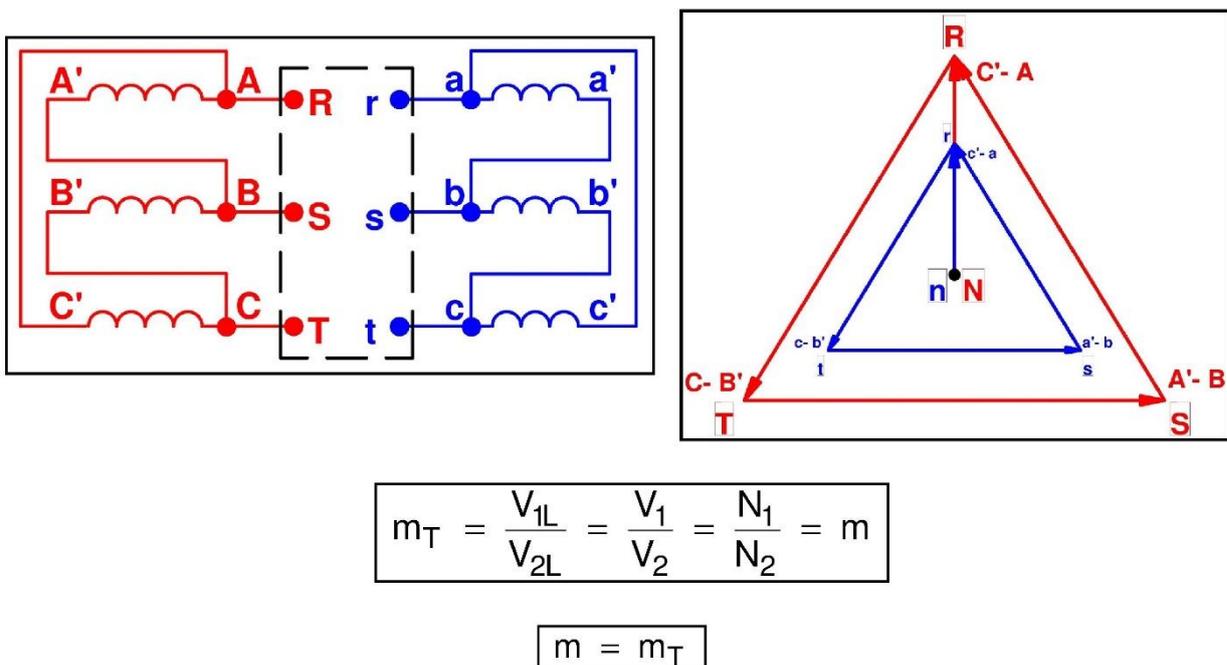


Fig. 35: Diagrama fasorial y relaciones de transformación de un transformador Dd0

Ejemplo 3: Conexión Yz11

En el transformador trifásico de la figura 36:

- a) Determine el índice horario.
- b) Indique la forma de conexión según la nomenclatura normalizada.
- c) Calcule la relación entre las relaciones de transformación de tensiones m_T y la relación de transformación m (suponga que el primario es el lado de A.T.).

Resolución:

a)

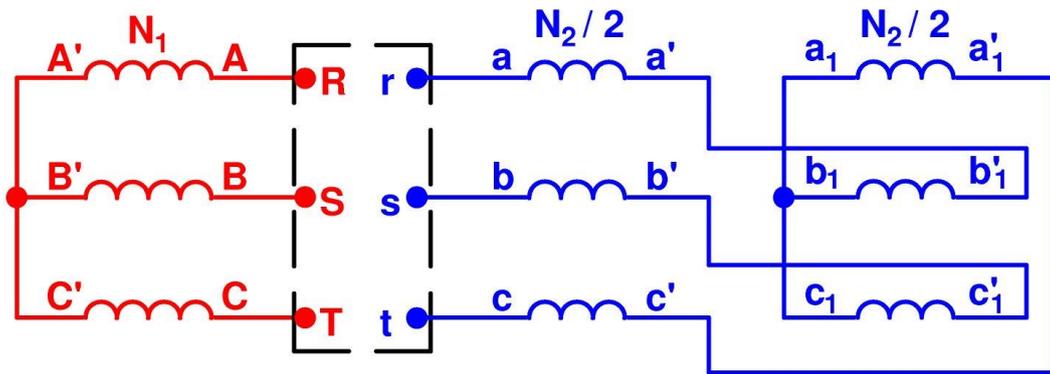


Fig. 36: Esquema de conexiones del transformador

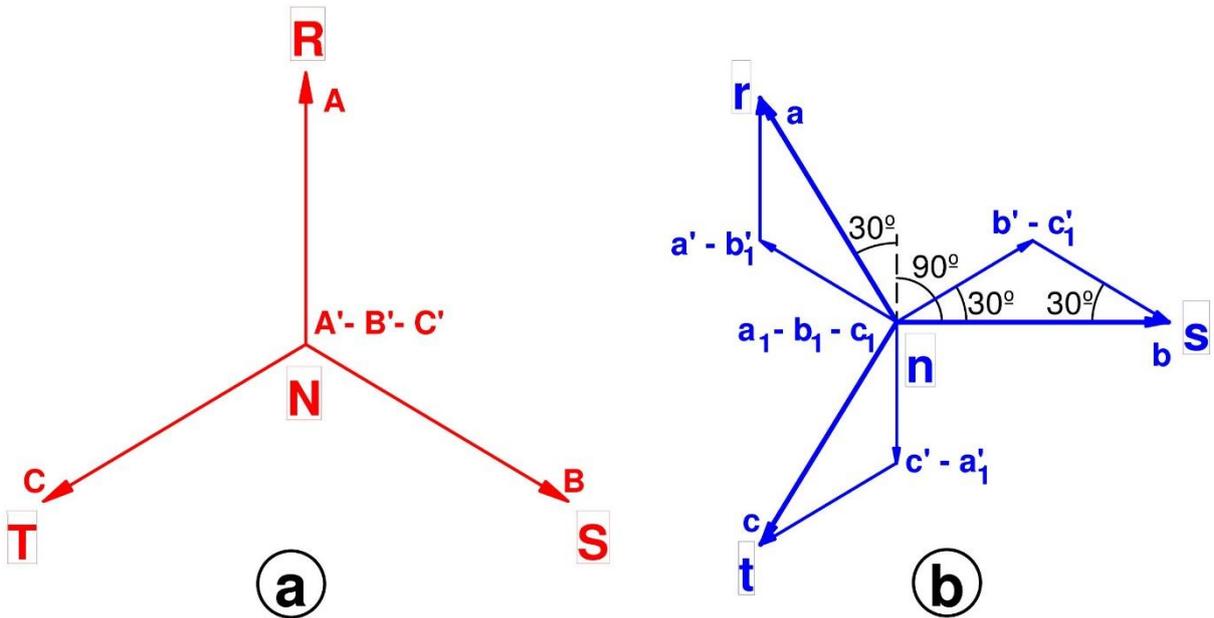


Fig. 37: Diagramas fasoriales de los devanados de A.T. (a) y de B.T. (b) del transformador

En el caso del transformador que nos ocupa, el devanado de A.T. está en estrella, por lo que las tensiones de fase son iguales las tensiones fase-neutro de la red a la que está conectado. Tal como están realizadas las conexiones del transformador (Fig. 36) se tiene que los terminales A', B' y C' están a la tensión del neutro de la red de A.T. y los terminales A, B y C están conectados a las fases de esta red. Por lo tanto, de las Figs. 31 y 36 se deduce el diagrama fasorial del bobinado de A.T. representado en la Fig. 37a.

TRANSFORMADORES TRIFÁSICOS CON CARGAS EQUILIBRADAS

A continuación, se dibuja el diagrama fasorial del arrollamiento de B.T. Este devanado está conectado en zig-zag con lo que cada fase tiene dos semidevanados, tal como se puede apreciar en la Fig. 36. En este tipo de devanado se tiene que las tensiones $V_{aa'}$ y $V_{a_1a'_1}$ están en fase entre sí y con $V_{AA'}$; análogamente sucede con las tensiones $V_{bb'}$, $V_{b_1b'_1}$ y $V_{BB'}$ y con las tensiones $V_{cc'}$, $V_{c_1c'_1}$ y $V_{CC'}$. Este diagrama se comienza a dibujar partiendo de su centro, que se corresponde con la tensión del neutro; es decir, con la tensión de los terminales a1, b1 y c1. A partir del centro se dibujan las tensiones $V_{a'_1a_1}$, $V_{b'_1b_1}$ y $V_{c'_1c_1}$ que son paralelas y de sentidos opuestos a $V_{AA'}$, $V_{BB'}$ y $V_{CC'}$, respectivamente. A continuación, se dibujan las tensiones $V_{aa'}$, $V_{bb'}$ y $V_{cc'}$ que son paralelas y de iguales sentidos a $V_{AA'}$, $V_{BB'}$ y $V_{CC'}$, respectivamente. Para ello se tiene en cuenta que los terminales a' y b'_1 están conectados entre sí, por lo que se encuentran a igual tensión, y lo mismo sucede con los terminales b' y c'_1 y con c' y a'_1.

Según se aprecia en las Figs. 36 y 37b, las tensiones fase-neutro del devanado de B.T. son V_{aa_1} , V_{bb_1} y V_{cc_1} , las cuáles se corresponden con las tensiones V_m , V_{sn} y V_{tn} , respectivamente. En la Fig. 36 se comprueba que la tensión V_{sn} forma un ángulo recto con respecto a la vertical. Dado que el desfase entre dos tensiones fase-neutro consecutivas es de 120° , se obtiene que la tensión V_m forma un ángulo de -30° con respecto a la vertical.

Si se dibujan superpuestos los diagramas fasoriales del devanado de A.T. (Fig. 37a) y del devanado de B.T. (Fig. 37b) de forma que los centros de ambos diagramas coincidan se obtiene el diagrama fasorial de la Fig. 38.

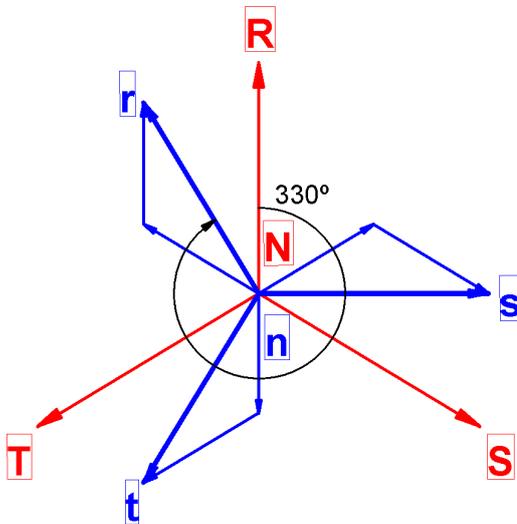


Fig. 38: Diagrama fasorial conjunto de ambos devanados del transformador

Se observa en la Fig. 38 que el desfase entre las tensiones homólogas fase-neutro V_{RN} del lado de A.T. y V_m del lado de B.T. (ángulo de desfase medido desde la tensión de A.T. a la de B.T. siguiendo el sentido de las agujas del reloj) es de 330° (igual a -30°). Dividiendo este ángulo entre 30° , se obtiene que el índice horario de este transformador es 11.

Otra forma de obtener el índice horario a partir de la Fig. 38 es asimilar los fasores que representan a las tensiones V_{RN} y V_m como las agujas de un reloj. La aguja larga es la correspondiente a la tensión de A.T. y la corta es la que se corresponde con la tensión de B.T. La hora que indican entonces estas agujas es el índice horario del transformador.

El índice horario de este transformador es 11.

TRANSFORMADORES TRIFÁSICOS CON CARGAS EQUILIBRADAS

- b) En este caso el devanado de A.T. está conectado en triángulo, el de B.T. en estrella y el índice horario es 11. Luego, la designación normalizada de este transformador es Yz11.

La designación normalizada de la forma de conexión de este transformador es Yz11.

- c) La relación de transformación de tensiones m_T se obtiene por cociente entre las tensiones de línea del primario V_{1L} y del secundario V_{2L} , mientras que la relación de transformación m se obtiene por cociente entre las tensiones de fase del primario V_1 y del secundario V_2 ; es decir, por cociente entre el número de espiras del primario N_1 y del secundario N_2 del transformador.

Al tratarse de un transformador con la conexión Yz y estar alimentado por el lado de A.T., el primario está conectado en estrella y el secundario en zig-zag.

Así pues, en el primario se tiene que:

$$\text{Primario (Estrella): } V_1 = \frac{V_{1L}}{\sqrt{3}} \rightarrow V_{1L} = \sqrt{3} \cdot V_1$$

Según se observa en la Fig. 37b, el triángulo $c_1-b'-b$ es isósceles. El ángulo obtuso es de 120° y, por ser isósceles, los otros dos ángulos son iguales. Como los tres ángulos de un triángulo suman 180° , resulta que los ángulos agudos deben medir 30° . En consecuencia, se cumple que:

$$V_{sn} = V_{bc_1} = 2 \cdot V_{bb'} \cdot \cos 30^\circ = 2 \cdot V_{bb'} \cdot \frac{\sqrt{3}}{2} = \sqrt{3} \cdot V_{bb'}$$

Evidentemente la tensión de línea en el secundario vale:

$$V_{2L} = \sqrt{3} \cdot V_{sn} = 3 \cdot V_{bb'}$$

Luego, se tiene que:

$$m_T = \frac{V_{1L}}{V_{2L}} = \frac{\sqrt{3} V_1}{3 V_{bb'}} = \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot \frac{N_1}{\frac{N_2}{2}} = \frac{2}{\sqrt{3}} \cdot \frac{N_1}{N_2} = \frac{2}{\sqrt{3}} \cdot m$$

$$m = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot m_T$$

La relación de transformación m de este transformador se obtiene multiplicando la relación de transformación de tensiones m_T por $\frac{\sqrt{3}}{2}$.



UNIVERSIDAD DE CANTABRIA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA
ELÉCTRICA Y ENERGÉTICA



TRANSFORMADORES

TRIFÁSICOS CON

CARGAS MONOFÁSICAS

Miguel Angel Rodríguez Pozueta

Doctor Ingeniero Industrial

TRANSFORMADORES TRIFÁSICOS CON CARGAS MONOFÁSICAS

Miguel Angel Rodríguez Pozueta

Conexión estrella-estrella con carga monofásica entre fase y neutro

Banco de 3 transformadores monofásicos o transformador trifásico de 5 columnas

Consideremos un banco de tres transformadores monofásicos conectados en estrella-estrella, con el neutro primario aislado y que en su secundario tenga conectada una carga monofásica entre la fase T y el neutro, como se muestra en la Fig. 1 (en esta figura y en las siguientes se va a suponer que el primario es el lado de alta tensión).

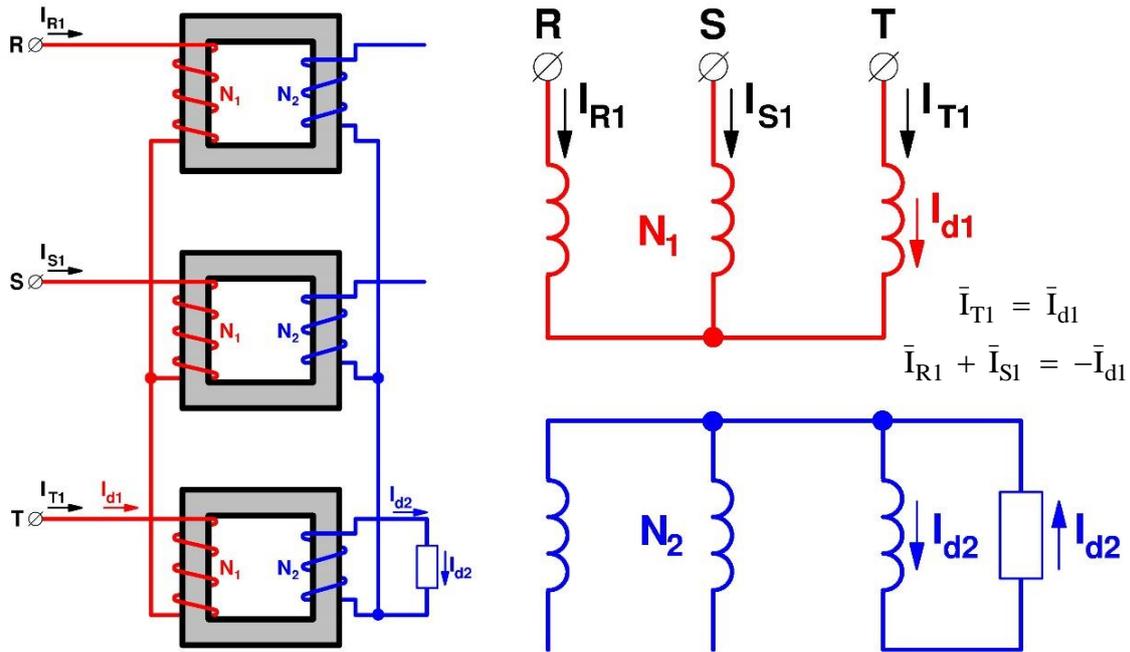


Fig. 1: Banco de tres transformadores monofásicos Yy con una carga monofásica fase-neutro

Como el neutro del primario está aislado se cumple que

$$\bar{I}_{R1} + \bar{I}_{S1} + \bar{I}_{T1} = 0$$

La carga monofásica da lugar a la circulación de una corriente I_{d2} por el secundario del transformador conectado en la fase T. Esta corriente I_{d2} obliga a que por el primario de este transformador circule la corriente I_{d1} . Así se consigue que el flujo en esta fase, Φ_T , no aumente excesivamente, puesto que se verifica lo siguiente

$$N_1 \bar{I}_{d1} - N_2 \bar{I}_{d2} = \mathcal{R} \bar{\Phi}_T \approx 0 \rightarrow \bar{I}_{d1} \approx \bar{I}_{d2} / m$$

Como el neutro de la estrella del primario no está conectado a la red, esta corriente I_{d1} se cierra a través de las otras fases, de tal manera que

$$\bar{I}_{R1} + \bar{I}_{S1} + \bar{I}_{T1} = 0 \rightarrow \bar{I}_{R1} + \bar{I}_{S1} = -\bar{I}_{T1} = -\bar{I}_{d1}$$

Ahora bien, si el transformador de la fase R funcionara con una marcha industrial sucedería que

$$N_1 \bar{I}_{R1} - N_2 \bar{I}_{R2} = N_1 \bar{I}_{R0} = \mathcal{R} \bar{\Phi}_R$$

Pero al conectar una carga monofásica entre la fase T y el neutro sucede que

$$\bar{I}_{R1} \gg \bar{I}_{R0} ; \quad \bar{I}_{R2} = 0$$

Así pues, ocurre que por el primario de la fase R circula una corriente que puede ser mucho más grande que su corriente de vacío, mientras que su corriente secundaria es nula. En consecuencia, el flujo en esta fase ahora es mayor que en marcha industrial:

$$\bar{\Phi}'_R = \frac{N_1 \bar{I}_{R1}}{\mathcal{R}'} \gg \frac{N_1 \bar{I}_{R0}}{\mathcal{R}} = \bar{\Phi}_R \quad \rightarrow \quad \bar{\Phi}'_R \gg \bar{\Phi}_R$$

Al ser el flujo del transformador monofásico de la fase R del banco mucho mayor que su flujo en marcha industrial (es decir, mayor que el flujo asignado), en los devanados de este transformador aparecerán unas fuerzas electromotrices (f.e.m.s) inducidas muy grandes. Esto origina unas sobretensiones en los devanados de la fase R que pueden dañar sus aislamientos. Lo mismo sucede en el transformador de la fase S.

En resumen, con este tipo de cargas dos de los tres transformadores monofásicos del banco están en vacío (su corriente secundaria es nula), pero en cada uno de ellos la corriente primaria es mucho mayor que la corriente de vacío en marcha industrial (es decir, con tensión y frecuencia primarias asignadas). En consecuencia, en estos transformadores el flujo magnético es mucho mayor que en condiciones asignadas, lo que hace que las f.e.m.s inducidas en sus devanados también tengan valores superiores a los asignados.

De lo anterior se deduce que las f.e.m.s de fase del banco están desequilibradas, tanto en el primario como en el secundario. En efecto, las f.e.m.s primaria y secundaria de la fase cargada (la fase T en la Fig. 1) disminuyen con respecto al funcionamiento con cargas equilibradas y las f.e.m.s de las otras dos fases (las fases R y S en la Fig. 1) aumentan y producen unas tensiones elevadas en estas fases (las cuales se tratan de tensiones fase-neutro debido a la conexión estrella del primario y del secundario). Sin embargo, no aumenta el valor de ninguna de las tensiones compuestas (entre fases) que siguen estando equilibradas porque las tensiones entre fases del primario están fijadas por la red a la que están conectadas.

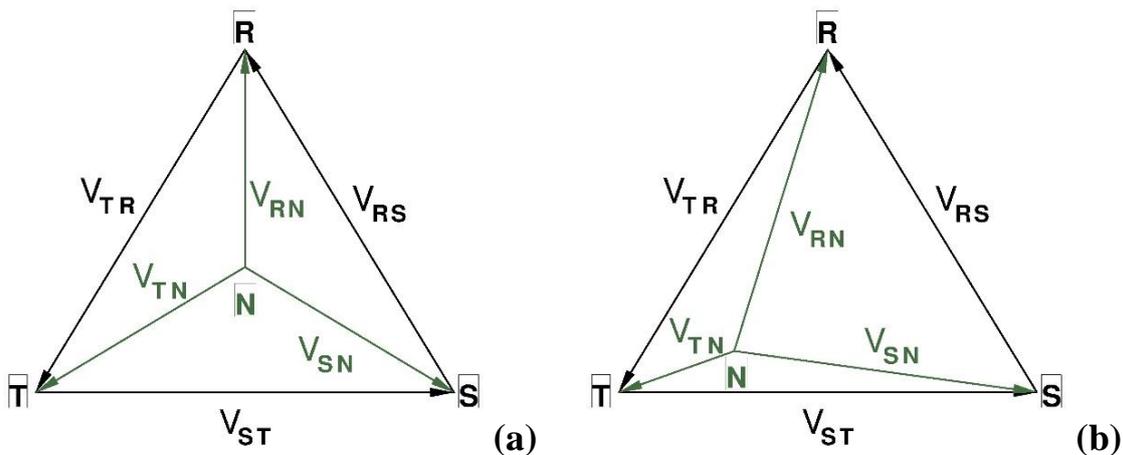


Fig. 2: Sistemas de tensiones fase-fase y fase-neutro en el primario o en el secundario de un banco de tres transformadores monofásicos estrella-estrella:

- a) equilibradas
- b) desequilibradas debido a la conexión de una carga monofásica en el secundario entre las fase T y el neutro

En la Fig. 2 se muestran las tensiones compuestas (esto es, las tensiones fase-fase) y las tensiones fase-neutro, bien del primario o bien del secundario, del banco de tres transformadores monofásicos, cuando están equilibradas (Fig. 2a) y cuando se desequilibran debido a la carga monofásica fase T-neutro (Fig. 2b). Se aprecia que este tipo de desequilibrio desplaza al punto neutro de su posición central, pero los lados del triángulo (las tensiones compuestas) quedan igual que en el caso equilibrado.

Este funcionamiento es incorrecto: un banco de tres transformadores monofásicos con conexión estrella-estrella y el neutro primario aislado no debe tener cargas desequilibradas fase-neutro.

Si en lugar de un banco de tres transformadores monofásicos, se trata de un transformador trifásico de cinco columnas se producen los mismos fenómenos. Esto se debe a que en ambos casos los flujos desequilibrados pueden circular fácilmente porque todo su recorrido se realiza por el núcleo magnético del equipo, el cual presenta pequeña reluctancia por estar fabricado con material ferromagnético (ver el siguiente apartado).

Transformador trifásico de tres columnas

Si se trata de un transformador trifásico de tres columnas conectado en estrella-estrella, el fenómeno es algo diferente. En efecto, las corrientes representadas en la Fig. 1 dan lugar a tres flujos no equilibrados cuya suma no es nula. Es decir,

$$\bar{\Phi}_R + \bar{\Phi}_S + \bar{\Phi}_T = \bar{\Phi}_{\text{Total}} \neq 0$$

En el banco de tres transformadores monofásicos, los flujos Φ_R , Φ_S y Φ_T circulan por circuitos magnéticos independientes. En el transformador trifásico de cinco columnas, las columnas laterales permiten una fácil circulación del flujo total Φ_{Total} .

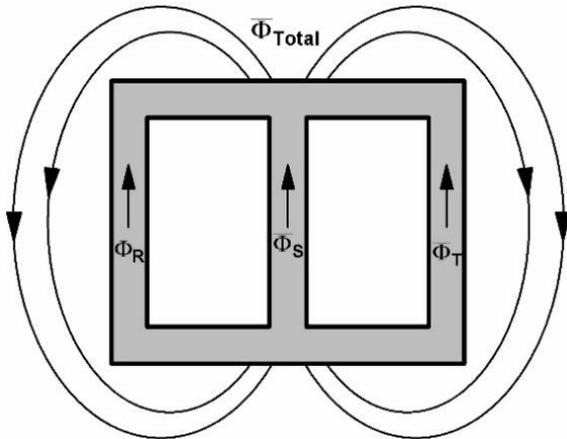


Fig. 3: Flujos desequilibrados cuya suma no es nula en un transformador de tres columnas

Sin embargo, en un transformador de tres columnas no hay ninguna parte del núcleo magnético de la máquina que permita que el flujo Φ_{Total} circule fácilmente. Por lo tanto, este flujo tiene que circular a través del aire y de la cuba del transformador, es decir, a través de un circuito de alta reluctancia (Fig. 3). Luego, ahora se tiene que:

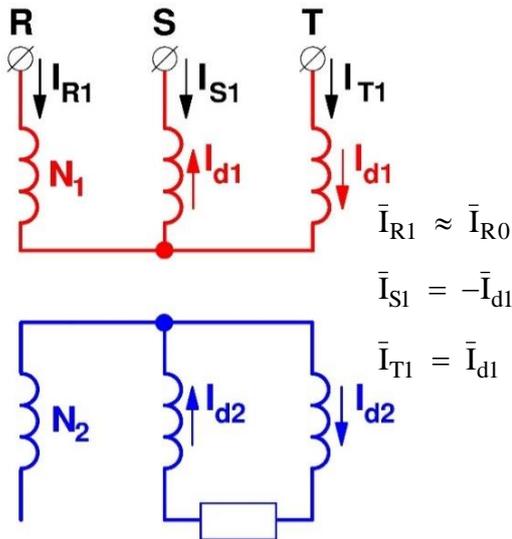
$$\bar{\Phi}'_R = \frac{N_1 \bar{I}_{R1}}{\mathcal{R}'} \quad \text{con } \mathcal{R}' \gg \mathcal{R}$$

Por lo tanto, en este caso se tiene un flujo Φ'_R que no es tan grande como en el banco de tres transformadores monofásicos y las sobretensiones son menores.

Se permiten cargas fase-neutro en los transformadores Yy de tres columnas, siempre que no originen corrientes superiores al 10% de la asignada.

Estos problemas se resolverían conectando el neutro del primario al de la red. Sin embargo, esto no se suele hacer para que no exista la posibilidad de circulación de terceros armónicos de corriente por el primario y así evitar la producción de interferencias sobre líneas telefónicas próximas (ver los apuntes sobre los armónicos en las corrientes de vacío).

Conexión estrella-estrella con carga monofásica fase-fase



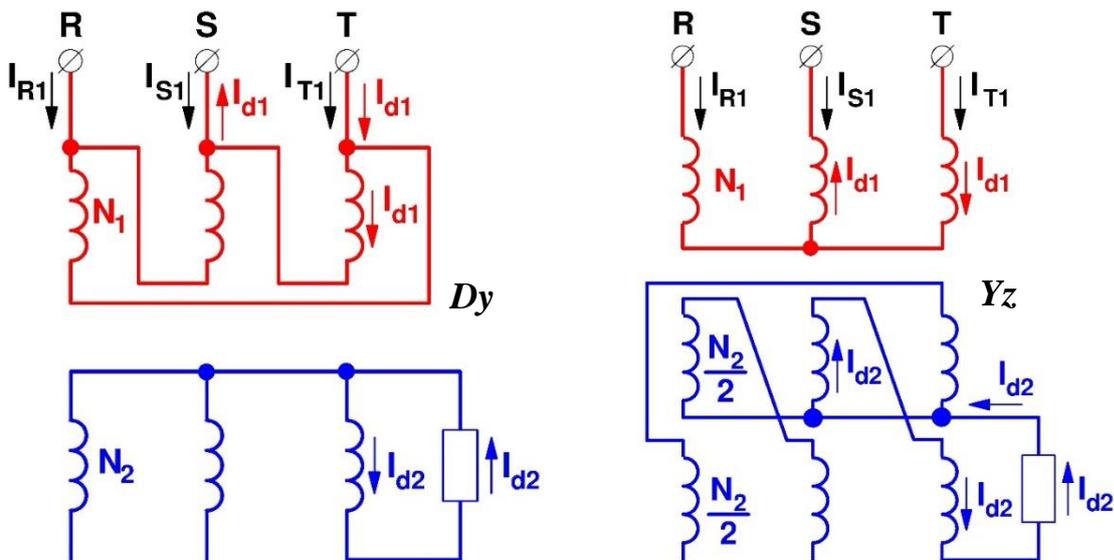
Si un banco de tres transformadores monofásicos o un transformador trifásico de tres o cinco columnas con la conexión estrella-estrella y con el neutro primario aislado tiene una carga monofásica conectada entre dos fases, no aparecen sobretensiones. Por lo tanto, en estos transformadores se admite este tipo de cargas.

En efecto, como se aprecia en la Fig. 4, en este caso no existe ninguna fase con una corriente en el primario que no esté contrarrestada por otra corriente en el secundario.

Fig. 4: Transformador Yy con carga monofásica entre fases

Otras conexiones (Yd, Dy, Dd, Yz)

Aparte de la conexión estrella-estrella con el neutro primario aislado, todas las demás admiten sin problemas la existencia de cargas desequilibradas fase-neutro o fase-fase.



Figs. 5 y 6: Conexiones Dy e Yz con cargas monofásicas fase-neutro

Así, en las figuras 5 y 6 se puede apreciar que en las conexiones triángulo-estrella y estrella-triángulo con carga fase-neutro no existen fases con una corriente superior a la de

vacío en el primario que no esté contrarrestada por otra en el secundario. Por lo tanto, con estas conexiones no aparecen sobretensiones, cualquiera que sea el tipo de transformador utilizado.

Arrollamientos terciarios o de compensación

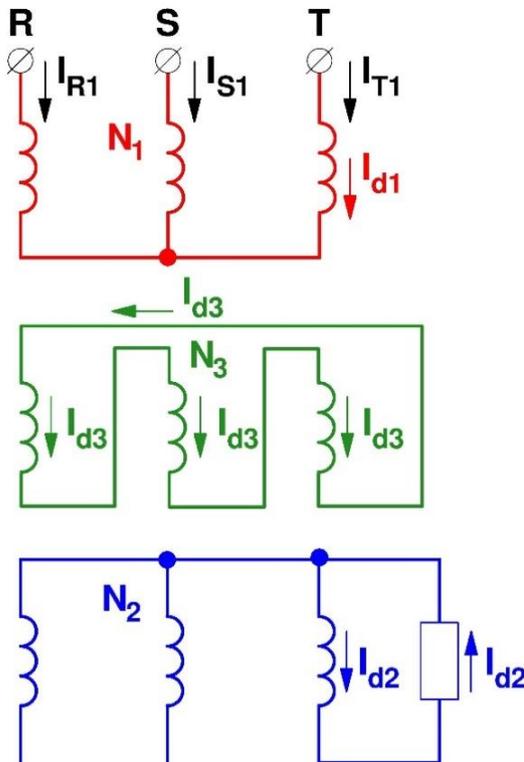


Fig. 7: Transformador Yy con devanado terciario o de compensación

Colocando un tercer arrollamiento en cada fase de un transformador estrella-estrella con el neutro primario aislado y conectando estos arrollamientos en triángulo desaparecen los inconvenientes debidos a las cargas desequilibradas entre fase y neutro (Fig. 7). Estos arrollamientos se denominan terciarios o de compensación.

En la Fig. 7 se verifica que

$$\begin{cases} \bar{I}_{R1} + \bar{I}_{S1} = -\bar{I}_{T1} = -\bar{I}_{d1} \\ \bar{I}_{R1} N_1 - \bar{I}_{d3} N_3 = \mathcal{R} \bar{\Phi}_R \\ \bar{I}_{S1} N_1 - \bar{I}_{d3} N_3 = \mathcal{R} \bar{\Phi}_S \\ \bar{I}_{T1} N_1 - \bar{I}_{d2} N_2 - \bar{I}_{d3} N_3 = \mathcal{R} \bar{\Phi}_T \end{cases}$$

Para cualquier corriente monofásica I_{d2} en el secundario aparecerán corrientes en los otros devanados que cumplen el sistema anterior.

Por lo tanto, en ninguna fase sucede que hay en un devanado una corriente mayor que la de vacío que no esté compensada por la corriente de, al menos, otro devanado. En consecuencia, el flujo es similar al asignado en todas las fases y no aparecen sobretensiones.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] FRAILE MORA, J. 2015. *Máquinas eléctricas*. Madrid: Ibergarçeta Publicaciones, S.L.
- [2] 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.
- [3] IVANOV-SMOLENSKI. 1984. *Máquinas eléctricas. Tomo 2*. Moscú: Editorial Mir.
- [4] KOSTENKO y PIOTROVSKI. 1979. *Máquinas eléctricas. Tomo II*. Moscú: Editorial Mir.
- [5] RAS OLIVA. 1998. *Transformadores de potencia, de medida y de protección*. Barcelona: Marcombo.



UNIVERSIDAD DE CANTABRIA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA
ELÉCTRICA Y ENERGÉTICA



TRANSFORMADORES
TRIFÁSICOS
CON CARGAS
DESEQUILIBRADAS

Miguel Angel Rodríguez Pozueta

Doctor Ingeniero Industrial

TRANSFORMADORES TRIFÁSICOS CON CARGAS DESEQUILIBRADAS

Miguel Angel Rodríguez Pozueta

Impedancias directa, inversa y homopolar en transformadores

Un sistema trifásico de tensiones o de intensidades *sinusoidales* de igual frecuencia es equilibrado si las tensiones o intensidades de las tres fases tienen el mismo valor eficaz y el desfase temporal entre dos de ellas es de 120° . Si no se cumple alguna de estas dos condiciones el sistema es desequilibrado. Las tres tensiones o intensidades de un sistema equilibrado sinusoidal suman siempre cero. El estudio de redes trifásicas desequilibradas con corrientes y tensiones sinusoidales se realiza mediante el método de las componentes simétricas.

El método de las componentes simétricas indica que un sistema trifásico de tensiones o de intensidades sinusoidales desequilibrado es equivalente a la suma de tres sistemas:

- Un sistema trifásico sinusoidal equilibrado de secuencia directa o positiva que tiene la misma secuencia de fases que el sistema trifásico desequilibrado de partida.
- Un sistema trifásico sinusoidal equilibrado de secuencia inversa o negativa cuya secuencia de fases es opuesta a la del sistema desequilibrado de partida.
- Un sistema trifásico sinusoidal homopolar o de secuencia cero. En él las tres tensiones o las tres intensidades están en fase y, por lo tanto, estas tres tensiones o intensidades son iguales, tanto en módulo como en argumento.

Es fácil comprobar, entonces, que la suma de las tres tensiones o intensidades del sistema homopolar no es igual a cero. En consecuencia, si las tres tensiones o intensidades del sistema sinusoidal desequilibrado original suman cero, su correspondiente sistema homopolar es nulo (carecen de sistema homopolar).

En un triángulo la suma de las tres corrientes de línea es nula y, por lo tanto, en esta conexión las corrientes de línea carecen de componente homopolar. Es sabido que la corriente en el neutro de una estrella es igual a la suma de las tres corrientes de fase, las cuáles son en este caso también corrientes de línea. En consecuencia, si una estrella tiene el neutro aislado su corriente de neutro es nula, por lo que sus tres corrientes de fase deben sumar cero y estas corrientes tendrán una componente homopolar nula. Sólo cuando la estrella tiene su neutro conectado al de la red es posible que haya corriente de neutro y que, consecuentemente, sus corrientes de fase (que también son de línea) tengan una componente homopolar no nula.

En resumen, la existencia de una componente homopolar de las corrientes de línea no nula exige que haya una corriente de neutro no nula.

Una transformación trifásica de tensiones se puede realizar por medio de un banco de tres transformadores monofásicos o mediante un transformador trifásico de tres o de cinco columnas. En la práctica se puede aceptar que estos equipos están equilibrados internamente; es decir, presentan la misma impedancia para cada una de sus fases. Por lo tanto, si uno de estos equipos se alimenta con un sistema trifásico de tensiones de secuencia directa, solamente se obtienen corrientes que forman un sistema de secuencia directa. Análogamente, un sistema de tensiones de secuencia inversa sólo origina corrientes de secuencia inversa y un sistema de tensiones homopolar sólo da lugar a corrientes homopolares. Esto es, en estos equipos no hay efectos cruzados entre las componentes simétricas de tensiones y de intensidades (todas ellas de igual frecuencia) y cada una de ellas se puede estudiar por separado empleando las impedancias correspondientes.

TRANSFORMADORES TRIFÁSICOS CON CARGAS DESEQUILIBRADAS

La impedancia por fase que presenta un transformador trifásico o un banco de tres transformadores monofásicos para los sistemas de secuencia directa e inversa es la misma (la que presenta frente a cargas equilibradas). Por lo tanto, el estudio del transformador o del banco para estos sistemas de secuencia se puede realizar utilizando el circuito equivalente que ya se conoce. Muchas veces este circuito equivalente se podrá reducir a la impedancia de cortocircuito Z_{cc} .

La impedancia homopolar Z_h de un transformador trifásico o de un banco de tres transformadores monofásicos depende de sus conexiones y de la forma del núcleo magnético. Para obtenerla experimentalmente se realiza un ensayo de cortocircuito homopolar. En este ensayo se alimenta con la misma tensión a las tres fases del primario (sistema de tensiones homopolar) y se cortocircuita el secundario y, además, este cortocircuito se une al neutro de la red.

En los siguientes apartados se va a indicar cómo es la impedancia homopolar Z_h para algunos tipos de transformaciones trifásicas. Para ello se va a mostrar su circuito equivalente para la secuencia homopolar. Estos circuitos equivalentes se refieren a una fase y el neutro (el cual se representa por medio de una línea de trazos). Esto es así porque las corrientes homopolares de línea, de existir, se cierran por el neutro.

Banco de tres transformadores monofásico estrella-estrella con ambos neutros unidos a la red

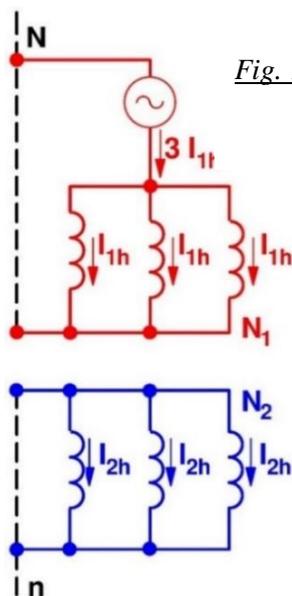


Fig. 1: Ensayo de cortocircuito homopolar en un banco con conexión YNyn

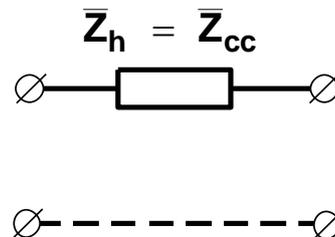


Fig. 2: Circuito equivalente homopolar de un banco YNyn

En este caso el ensayo de cortocircuito homopolar está representado en la Fig. 1. En esta figura y en las siguientes se va a suponer que el primario es el lado de alta tensión.

Al tratarse de transformadores monofásicos los flujos homopolares pueden circular sin problemas por el núcleo magnético de cada transformador. Además, al estar ambos neutros unidos a la red puede haber corrientes homopolares tanto en el primario como en el secundario.

Por lo tanto, cada transformador del banco queda conectado en cortocircuito y, en consecuencia, presentará una impedancia igual a la de cortocircuito Z_{cc} . El circuito equivalente homopolar para este banco será, pues, el representado en la Fig. 2.

TRANSFORMADORES TRIFÁSICOS CON CARGAS DESEQUILIBRADAS

El transformador trifásico de cinco columnas se comporta de igual manera que el banco de tres transformadores monofásicos y su circuito equivalente homopolar para esta conexión también será el representado en la Fig. 2. Esto se debe a que en ambos casos los flujos homopolares pueden circular fácilmente porque todo su recorrido se realiza por el núcleo magnético del equipo, el cual presenta pequeña reluctancia por estar fabricado con material ferromagnético.

Transformador trifásico de 3 columnas estrella-estrella con ambos neutros unidos a la red

Al igual que en el caso anterior en este transformador pueden existir corrientes homopolares en el primario y en el secundario. Sin embargo, en un transformador de tres columnas el núcleo magnético está diseñado para conducir flujos cuya suma sea nula; luego los flujos homopolares que estas corrientes generan se ven forzados a cerrarse por el aire y por la cuba del transformador, los cuales presentan una reluctancia elevada (Fig. 3).

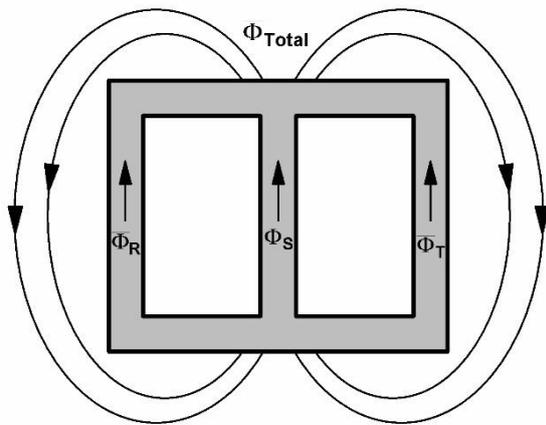


Fig. 3: Si la suma de los tres flujos de fase en un transformador trifásico de tres columnas no es nula (lo que equivale a que los flujos tienen una componente homopolar no nula), el flujo total resultante (que es proporcional al flujo homopolar) se debe cerrar por fuera del núcleo magnético y se encuentra con un camino de gran reluctancia.

Esto hace que para obtener los mismos flujos homopolares (y, por tanto, los mismos enlaces de flujo homopolares Ψ_h) se requieran corrientes homopolares I_h más elevadas que en el caso anterior. De esto se deduce que:

$$L_h = \frac{\Psi_h}{I_h} \ll L_{cc} \rightarrow X_h \ll X_{cc} \rightarrow \boxed{Z_h \ll Z_{cc}}$$

Es decir, para este transformador el circuito equivalente homopolar es similar al dibujado en la Fig. 2, pero con un menor valor de la impedancia Z_h .

Banco de tres transformadores monofásico estrella-estrella con sólo el neutro primario unido a la red (o sólo el neutro secundario)

En este caso el ensayo de cortocircuito homopolar es el representado en la Fig. 4. En ella se aprecia que ahora por el secundario no pueden circular corrientes homopolares, pues al estar el neutro aislado no tienen un camino por donde cerrar su recorrido.

Luego, cada uno de los transformadores monofásicos del banco tiene su secundario sin corriente, es decir, está en vacío. Por lo tanto, la impedancia homopolar que presenta este banco corresponde a la rama en paralelo del circuito equivalente de cada transformador. Es decir, una impedancia muy elevada, casi infinita.

Se deduce, pues, que el circuito equivalente homopolar para este banco es el representado en la Fig. 5, el cual también es válido para transformadores trifásicos de 5 columnas.

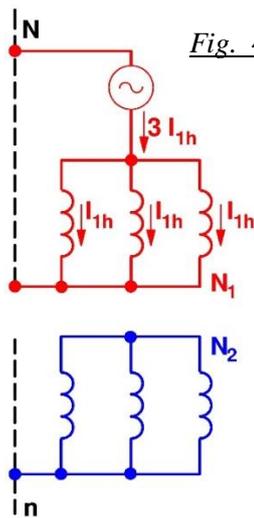


Fig. 4: Ensayo de cortocircuito homopolar en un banco con conexión YNy

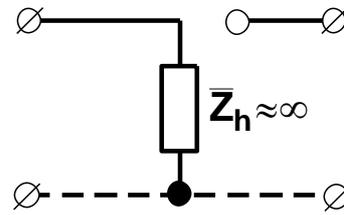


Fig. 5: Circuito equivalente homopolar de un banco YNy

Transformador trifásico de tres columnas estrella-estrella con sólo el neutro primario conectado a la red

Este caso es similar al anterior, pero con la diferencia de que los flujos homopolares no se cierran por el núcleo magnético, sino por la cuba y el aire (Fig. 3). Por lo tanto, en el ensayo de cortocircuito homopolar para generar los mismos flujos se necesitará ahora que circulen unas corrientes mayores que para el banco de tres transformadores monofásicos. Luego, el circuito equivalente homopolar de este transformador será como el de la Fig. 5, pero con una impedancia Z_h menor (suele tomar un valor entre el 20 y el 100% de V_{1N}/I_{1N}).

Banco de tres transformadores monofásico estrella-triángulo con el neutro a la red

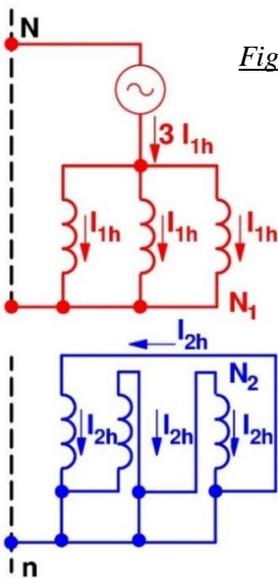


Fig. 6: Ensayo de cortocircuito homopolar en un banco con conexión YNd

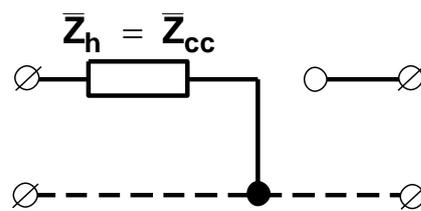


Fig. 7: Circuito equivalente homopolar de un banco YNd

En este caso el ensayo de cortocircuito homopolar es el representado en la Fig. 6. La conexión triángulo hace que en este ensayo las tres f.e.m.s inducidas en el secundario estén en serie y el conjunto de todas ellas en cortocircuito. Esto equivale a que cada transformador del banco estuviera en cortocircuito. Además, se aprecia que la intensidad homopolar del secundario sólo circula por las fases (dentro del triángulo), pero no por la línea. En consecuencia, el circuito equivalente homopolar de este banco es el representado en la Fig. 7, el cual también es válido para transformadores trifásicos de cinco columnas.

Transformador trifásico de tres columnas estrella-triángulo con el neutro a la red

El circuito equivalente homopolar de este transformador será como el de la Fig. 7, pero con una impedancia Z_h menor debido a que los flujos homopolares no se pueden cerrar por el núcleo magnético y deben hacerlo a través de un camino de alta reluctancia, como el aire y la cuba del transformador (Fig. 3).

Transformación triángulo-estrella con el neutro unido a la red

Para obtener el circuito equivalente homopolar basta con invertir el correspondiente a la conexión estrella-triángulo con el neutro unido a la red (ver la Fig. 7 y los apartados anteriores). Se obtiene, pues el circuito equivalente de la Fig. 8.

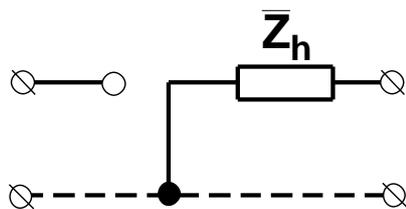


Fig. 8: Circuito equivalente homopolar de un banco Dyn

Transformaciones estrella-triángulo y triángulo-estrella con el neutro aislado

En estos casos no pueden circular corrientes homopolares ni por el primario ni por el secundario. La impedancia homopolar es, pues, infinita; tanto para el banco de transformadores monofásicos como para los transformadores trifásicos de tres y de cinco columnas.

En consecuencia, para estas conexiones el circuito equivalente homopolar es el representado en la Fig. 9.

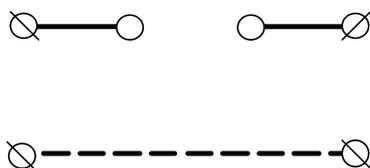


Fig. 9: Circuito equivalente homopolar para las conexiones Yd y Dy

Otras conexiones

Razonando de manera análoga a como se ha hecho en los casos anteriores se pueden deducir los circuitos equivalentes homopolares de todas las posibles conexiones para una transformación de tensiones trifásica.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] FRAILE MORA, J. 2015. *Máquinas eléctricas*. Madrid: Ibergarcelona Publicaciones, S.L.
- [2] GRAINGER, J. J. y STEVENSON, W. D. 1996. *Análisis de Sistemas de Potencia*. Méjico: McGraw-Hill/Interamericana de Méjico, S.A.
- [3] IVANOV-SMOLENSKI. 1984. *Máquinas eléctricas. Tomo 2*. Moscú: Editorial Mir.
- [4] KOSTENKO y PIOTROVSKI. 1979. *Máquinas eléctricas. Tomo II*. Moscú: Editorial Mir.
- [5] RAS OLIVA. 1998. *Transformadores de potencia, de medida y de protección*. Barcelona: Marcombo.



UNIVERSIDAD DE CANTABRIA
*DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA
ELÉCTRICA Y ENERGÉTICA*



ARMÓNICOS EN LAS CORRIENTES
DE VACÍO, EN LOS FLUJOS Y EN LAS
TENSIONES DE TRANSFORMADORES

Miguel Angel Rodríguez Pozueta

Doctor Ingeniero Industrial

ARMÓNICOS EN LAS CORRIENTES DE VACÍO, EN LOS FLUJOS Y EN LAS TENSIONES DE TRANSFORMADORES

Miguel Angel Rodríguez Pozueta

Corriente de vacío en un transformador monofásico

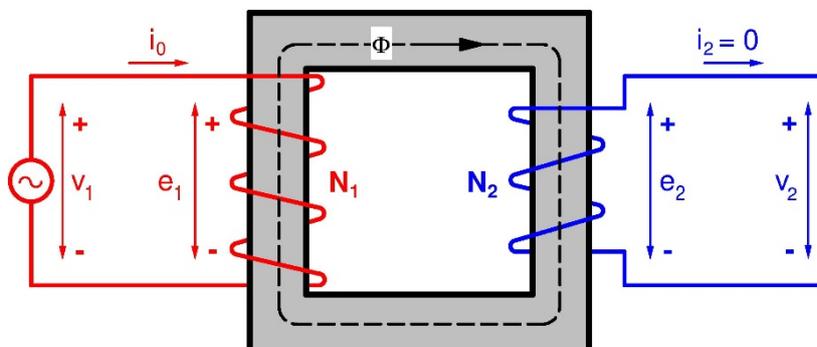


Fig. 1: Transformador monofásico en vacío

Un transformador funciona en vacío cuando no alimenta a ninguna carga desde su secundario; es decir, cuando su potencia secundaria es nula. En este estado la corriente secundaria también es nula y la corriente primaria es pequeña y se denomina *corriente de vacío* i_0 (Fig. 1).

La corriente de vacío de un transformador monofásico es tan pequeña que se pueden despreciar las caídas de tensión en el primario y aceptar que:

$$i_0 \ll \Rightarrow v_1 = e_1 = N_1 \frac{d\Phi}{dt}; \quad i_2 = 0 \Rightarrow v_2 = e_2 = N_2 \frac{d\Phi}{dt} \quad (1)$$

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 (Fig. 2).

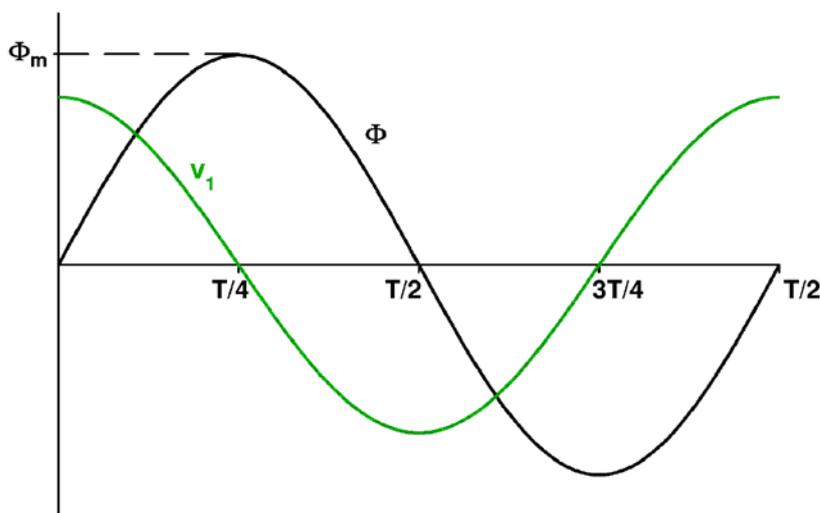


Fig. 2: Tensión primaria y flujo de un transformador monofásico en vacío

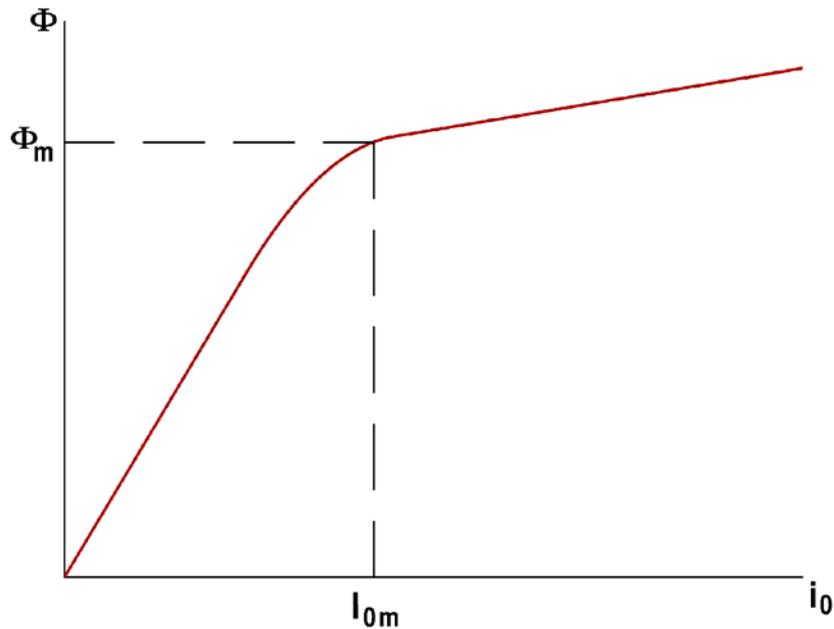


Fig. 3: Característica de vacío de un transformador

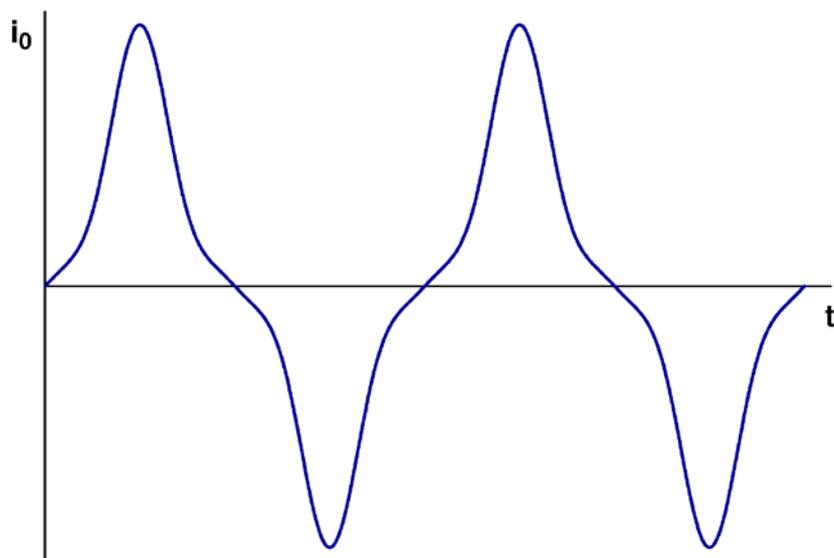


Fig. 4: Corriente de vacío de un transformador monofásico

En vacío la única fuerza magnetomotriz (f.m.m.) que existe es la debida a la corriente de vacío i_0 . La relación entre el flujo Φ y la corriente de vacío i_0 se obtiene a partir de la curva de saturación del material ferromagnético con el que se construye el núcleo del transformador y está representada en la Fig. 3. Dado que este material tiene un ciclo de histéresis pequeño, en lo que sigue no se tendrá en cuenta el fenómeno de la histéresis magnética.

Normalmente los transformadores se diseñan para que a la tensión asignada el núcleo magnético se encuentre en la zona del codo de la curva de magnetización. Esto se puede apreciar en la Fig. 3 donde se indican los valores máximos del flujo Φ_m y de la corriente i_{0m} del transformador en el régimen permanente de la marcha de vacío a la tensión asignada.

Dado que la relación entre el flujo y la corriente de vacío (Fig. 3) no es lineal, se obtiene que, si el flujo en régimen permanente es una función sinusoidal (Fig. 2), la corriente de vacío no lo es y tiene la forma representada en la Fig. 4.

La forma no sinusoidal de la corriente de vacío complica el análisis del transformador. En efecto, la representación de corrientes mediante fasores -y, por lo tanto, mediante números complejos- solamente es válida para magnitudes que varían en el tiempo de forma sinusoidal. Por esta razón, a la hora de estudiar los transformadores se sustituye su corriente de vacío real por una equivalente sinusoidal. Esta equivalente es una onda sinusoidal del mismo valor eficaz que la onda real y con un desfase con respecto a la tensión primaria tal que da lugar a las mismas pérdidas en el hierro que la corriente real. Esta corriente equivalente sinusoidal es la que se maneja en el circuito equivalente del transformador y en sus ecuaciones y es la que se representa mediante el fasor \bar{I}_0 .

Banco de tres transformadores monofásicos o transformador trifásico de cinco columnas con conexión estrella-estrella en vacío

a) Neutro primario conectado a la red

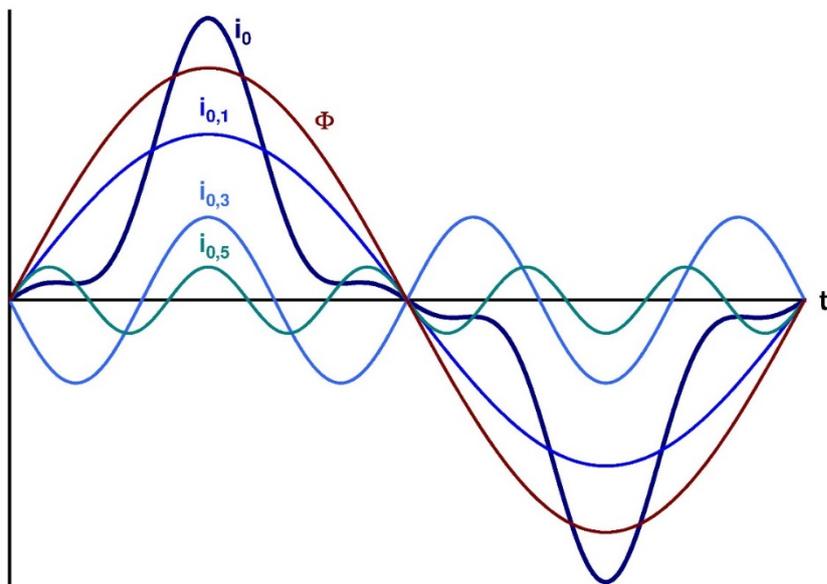


Fig. 5: Curvas de corriente de vacío i_0 y del flujo Φ con presencia del tercer armónico en la corriente i_0

Considérese un banco de tres transformadores monofásicos conectados en estrella-estrella que está en vacío. Si el neutro primario no está aislado, la red primaria obliga a que las tensiones fase-neutro (que son las tensiones de fase en la conexión estrella) sean sinusoidales. Como se ha visto al estudiar el comportamiento en vacío de los transformadores monofásicos, si la tensión de fase varía sinusoidalmente con el tiempo, por cada uno de los transformadores del banco tratará de circular una corriente de vacío no sinusoidal (Fig. 4). Esto es debido a la relación no lineal que existe entre el flujo y la intensidad de vacío (Fig. 3).

La descomposición en *serie de Fourier* señala que esta corriente de vacío -que es una función del tiempo periódica de frecuencia f , pero no es sinusoidal- es igual a la suma de infinitas ondas sinusoidales de diferente frecuencia denominadas *armónicos* (Fig. 5). La frecuencia $f_{h'}$ y la pulsación $\omega_{h'}$ de un armónico de *orden* h' son así:

$$f_{h'} = h' \cdot f \quad \omega_{h'} = 2\pi f_{h'} = h' \cdot \omega \quad (\omega = 2\pi f) \quad (2)$$

En este caso únicamente existen armónicos de orden h' impar. La amplitud de estos armónicos es menor cuanto mayor es su orden h' , por lo que los armónicos de orden superior son despreciables. En la Fig. 5 se muestran la corriente de vacío de una fase, sus armónicos de orden 1, 3 y 5 y el flujo, el cual varía en el tiempo de una forma perfectamente sinusoidal (ver también la Fig. 2 y la Fig. 4).

El armónico de orden unidad ($h' = 1$) es el *primer armónico* o *armónico fundamental* (de la misma frecuencia que la onda original, que en España usualmente es 50 Hz) y el resto son los *armónicos adicionales*. El único armónico adicional de i_0 que se va a considerar va a ser el de orden 3 (que, para una frecuencia fundamental de 50 Hz, tiene una frecuencia de 150 Hz). Es decir, en la práctica se puede admitir que la corriente de vacío i_0 está deformada solamente por la aparición de un tercer armónico y despreciar el resto de los armónicos adicionales.

Los terceros armónicos (y el resto de los armónicos múltiplos de 3) de las tres corrientes de fase del banco de tres transformadores monofásicos están desfasados entre sí un ángulo de $3 \times 120^\circ = 360^\circ = 0^\circ$. Es decir, estas 3 corrientes terceras armónicas están en fase y tienen el mismo valor eficaz, luego forman un sistema homopolar:

$$\begin{aligned}
 i_{R0,3} &= \sqrt{2} I_{0,3} \cos(3\omega t) \\
 i_{S0,3} &= \sqrt{2} I_{0,3} \cos\left[3\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right)\right] = \sqrt{2} I_{0,3} \cos(3\omega t) \\
 i_{T0,3} &= \sqrt{2} I_{0,3} \cos\left[3\left(\omega t + \frac{2\pi}{3}\right)\right] = \sqrt{2} I_{0,3} \cos(3\omega t) \\
 \bar{I}_{R0,3} &= \bar{I}_{S0,3} = \bar{I}_{T0,3} (= \bar{I}_{0,3})
 \end{aligned}
 \tag{3}$$

b) Neutro primario aislado

No es conveniente que por las líneas aéreas de frecuencia asignada 50 Hz circulen armónicos de corriente cuya frecuencia sea $3 \times 50 = 150$ Hz (terceros armónicos; es decir, de orden $h' = 3$), ya que se trata de una frecuencia audible y se pueden producir interferencias sobre líneas telefónicas cercanas.

Por esta razón, en las líneas de Alta Tensión (A.T.) no se suele disponer de un conductor neutro y el neutro del primario del banco de transformadores está aislado. De esta manera no puede existir corriente de neutro y se obliga a que las tres intensidades de fase tengan siempre una suma nula. En el caso de los terceros armónicos de corriente, como forman un sistema homopolar, si su suma es nula se obliga a que también sean nulos los terceros armónicos de corriente de cada fase.

Por lo tanto, un banco de transformadores estrella-estrella con el neutro primario aislado consume en vacío unas corrientes sin terceros armónicos y, en consecuencia, prácticamente sinusoidales. Pero la curva Φ - i_0 (Fig. 3) hace que si la intensidad es sinusoidal el flujo no lo sea y tenga terceros armónicos (Fig. 6). A su vez, las fuerzas electromotrices (f.e.m.s) inducidas por fase, e_1 en el primario y e_2 en el secundario, al ser de la misma forma que la derivada temporal del flujo ($d\Phi/dt$), tendrán también terceros armónicos. En vacío las tensiones de fase son prácticamente iguales a estas f.e.m.s de fase y, consecuentemente, en este caso tienen terceros armónicos.

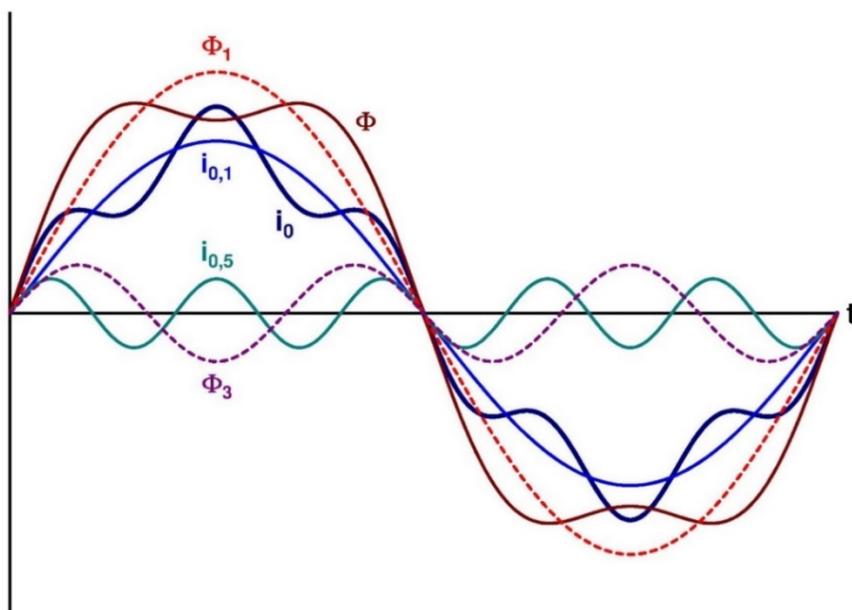


Fig. 6: Curvas de corriente de vacío i_0 y del flujo Φ con ausencia del tercer armónico en la corriente i_0

Es decir, la imposibilidad de que circulen corrientes homopolares por el primario del banco de transformadores, cuyo neutro ahora está aislado, hace que el flujo tenga terceros armónicos y el transformador actúe como generador de terceros armónicos (homopolares) de las f.e.m.s y de las tensiones de fase (de frecuencia 150 Hz si la red es de 50 Hz), tanto en el primario como en el secundario.

Estos terceros armónicos de las tensiones de fase pueden originar aumentos de tensión peligrosos en los devanados de los transformadores e, incluso, dar lugar a fenómenos de resonancia en la red. Esto obliga a que con este tipo de conexión los transformadores del banco se tengan que diseñar para que trabajen con poca saturación, lo que los hace más grandes y caros. De esta manera funcionarán prácticamente sobre la zona lineal de la curva Φ - i_0 y se reducen los terceros armónicos del flujo y de las f.e.m.s y tensiones de fase.

A pesar de la existencia de terceros armónicos en las tensiones fase-neutro, las tensiones fase-fase carecen de terceros armónicos. Así, por ejemplo, en el secundario el tercer armónico de la tensión de vacío entre las fases R y S vale:

$$\bar{V}_{RS\ 20,3} = \bar{V}_{RN\ 20,3} - \bar{V}_{SN\ 20,3} = \bar{E}_{R\ 2,3} - \bar{E}_{S\ 2,3} = 0 \quad (4)$$

ya que, como los terceros armónicos forman un sistema homopolar, sucede que:

$$\bar{E}_{R\ 2,3} = \bar{E}_{S\ 2,3} \quad (5)$$

Las tensiones fase-fase del primario están fijadas por la red primaria, luego estas tensiones son perfectamente sinusoidales y no puede haber armónicos en ellas. Por lo tanto, lo que no puede suceder es que en los flujos y, consecuentemente, en las f.e.m.s y tensiones de fase existan armónicos no homopolares (de orden no múltiplo de 3). En efecto, si estos armónicos de tensión de fase existieran formarían un sistema trifásico equilibrado y darían lugar a armónicos de amplitud $\sqrt{3}$ veces mayor en las tensiones fase-fase; pero estas, como se acaba de ver, no pueden tener armónicos. Así pues, en este caso podrá haber armónicos equilibrados (no homopolares) en la corriente de

vacío, pero nunca en los flujos ni en las f.e.m.s y tensiones de fase (como se aprecia en las figuras 5, 6 y 7 para el armónico de orden 5). De todos modos, estos armónicos de orden superior a 3 son poco relevantes y, en principio, se van a despreciar.

c) Comparación entre que el neutro primario esté unido a la red o esté aislado

Si se tiene un banco de tres transformadores monofásicos con la conexión estrella-estrella y con el neutro primario unido a la red, la red primaria hace que las tensiones de fase (fase-neutro en este caso) sean perfectamente sinusoidales; por lo que la corriente estará deformada (debido a la forma de la curva $\Phi-i_0$ (Fig. 3)) y tendrá multitud de armónicos adicionales, de los cuales solamente es importante el tercero, que sí puede existir porque puede circular por el neutro. Si el neutro primario está aislado, la red obliga a que las tensiones fase-fase sean sinusoidales, pero las tensiones fase-neutro pueden tener terceros armónicos (pero no armónicos adicionales de orden no múltiplo de 3). En este caso la corriente de cada fase del primario se ve obligada a carecer de terceros armónicos (aunque sí puede tener armónicos adicionales de orden no múltiplo de 3) y es prácticamente sinusoidal.

Esto es, si existe tercer armónico en las corrientes de vacío no existirán terceros armónicos de flujo ni de f.e.m.s y tensiones de fase. Y, viceversa, si no existe tercer armónico en las corrientes de vacío sí existirán terceros armónicos de flujo, de f.e.m.s y tensiones de fase (Fig. 7). Los demás armónicos (no múltiplos de 3) son poco importantes y únicamente pueden existir en las corrientes de vacío, pero no en los flujos ni en las f.e.m.s ni en las tensiones de fase.

Lo mismo que se ha explicado para un banco de tres transformadores monofásicos sucede en *transformadores trifásicos de cinco columnas*. Esto se debe a que en ambos casos los núcleos magnéticos de los transformadores permiten la fácil circulación de flujos homopolares.

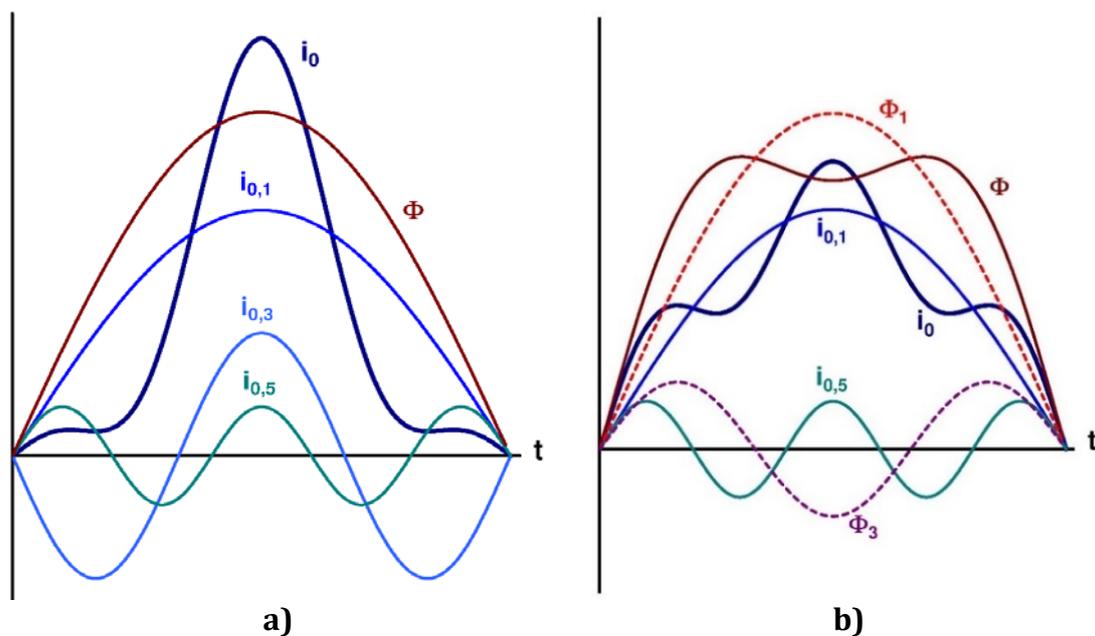


Fig. 7: Curvas de corriente de vacío i_0 y del flujo Φ en la conexión Yy:

- a) Con presencia del tercer armónico en la corriente i_0 (neutro primario no aislado)
- b) Con ausencia del tercer armónico en la corriente i_0 (neutro primario aislado)

Componentes simétricas y series de Fourier en sistemas trifásicos

Anteriormente se ha indicado que al aplicar las *series de Fourier* los armónicos múltiplos de 3 de las corrientes, f.e.m.s, tensiones y flujos forman sistemas trifásicos homopolares y el resto de los armónicos forman sistemas trifásicos equilibrados. Esto puede desconcertar al alumno al confundir esta forma de trabajar con la aplicación del *método de las componentes simétricas* a sistemas trifásicos desequilibrados. En este apartado se van a clarificar estos conceptos.

Para centrar ideas se va a partir de un sistema trifásico de corrientes, pero todo lo que se diga a continuación también es válido para sistemas trifásicos de otras magnitudes: flujos, f.e.m.s, tensiones, etc. Todas las definiciones que siguen se refieren a funcionamientos en régimen permanente en los que todas las magnitudes son funciones periódicas del tiempo.

Cuando se dice que entre dos corrientes de igual frecuencia f (y, por lo tanto, de igual pulsación ω) hay un desfase de γ radianes, significa que el valor máximo de la segunda corriente se produce con un *retraso* temporal de Δt segundos con respecto al valor máximo de la primera corriente tal que

$$\omega \cdot \Delta t = \gamma \text{ radianes} \quad (\omega = 2 \pi f) \quad (6)$$

De lo anterior se deduce que el desfase γ de la corriente de una fase B respecto a la corriente de otra fase A es positivo si el valor máximo de la corriente i_B se produce con un *retraso* γ respecto al máximo de i_A y es negativo si el máximo de i_B se produce con un *adelanto* γ respecto al máximo de i_A .

El orden o secuencia de fases de un sistema trifásico de corrientes queda establecido por el orden temporal en que suceden los valores máximos de las tres corrientes. Así, si se tienen tres fases A, B y C y tras el máximo de i_A se produce el máximo de i_B y luego el de i_C , la secuencia será A-B-C. Pero si al máximo de i_A le sigue el máximo de i_C y posteriormente el máximo de la corriente i_B , la secuencia de fases es A-C-B.

Un sistema trifásico de corrientes *sinusoidales* es equilibrado si las tres corrientes tienen el mismo valor eficaz y el desfase entre cada par de ellas es de 120° (o $2\pi/3$ radianes). Un sistema trifásico de corrientes en el que no se cumple alguna o algunas de las condiciones anteriores es un sistema trifásico desequilibrado. En un sistema trifásico equilibrado de corrientes sinusoidales sucede que la suma de las tres corrientes siempre vale cero.

Un sistema trifásico de corrientes *sinusoidales* es homopolar o de secuencia cero si las tres corrientes tienen iguales frecuencia y valor eficaz y no hay desfase entre ellas (el ángulo de desfase es de 0°). La suma de las tres corrientes de un sistema homopolar es igual a tres veces el valor de una de ellas.

Cuando se tiene un sistema trifásico *desequilibrado* de corrientes *perfectamente sinusoidales* el método de las componentes simétricas dice que este sistema es igual a la suma de tres sistemas trifásicos de corrientes, también perfectamente sinusoidales y de la misma frecuencia que las corrientes desequilibradas de partida. Estos tres sistemas son:

- Un sistema trifásico sinusoidal equilibrado de *secuencia directa* o *positiva* que tiene la misma secuencia de fases que el sistema trifásico desequilibrado de partida.
- Un sistema trifásico sinusoidal equilibrado de *secuencia inversa* o *negativa* cuya secuencia de fases es opuesta a la del sistema desequilibrado de partida.
- Un sistema trifásico sinusoidal *homopolar* o *de secuencia cero*.

Por otra parte, cuando se tiene un sistema trifásico de corrientes *no sinusoidales* -pero que varían periódicamente en el tiempo- con igual forma de onda (no sinusoidal en este caso), el mismo valor eficaz, la misma frecuencia y que están desfasadas 120° entre sí, la descomposición en series de Fourier de estas tres corrientes hace que cada una de ellas sea igual a la suma de infinitos *armónicos*, los cuales varían sinusoidalmente en el tiempo con frecuencias

diferentes unos de los otros. Dichas frecuencias son múltiplos enteros de la frecuencia de las corrientes de partida (ver la relación (2), donde h' es el orden del armónico considerado). Se obtiene, entonces, que para cada orden armónico h' hay tres corrientes (una por cada fase) perfectamente sinusoidales que forman un sistema homopolar cuando el orden h' es múltiplo de tres y forman un sistema equilibrado, de secuencia directa o de secuencia inversa, para el resto de los órdenes armónicos.

Comparando el método de las componentes simétricas y la aplicación de las series de Fourier a un sistema trifásico de corrientes se observan estas diferencias:

- Las tres corrientes originales son sinusoidales en el método de las componentes simétricas y no sinusoidales cuando se aplican las series de Fourier.
- Las tres corrientes originales están desequilibradas cuando se utiliza el método de las componentes simétricas, mientras que al aplicar las series de Fourier las tres corrientes de partida, aunque no son sinusoidales, tienen la misma forma de onda (con iguales amplitud y frecuencia) y un desfase de 120° entre cada par de fases.
- En ambos métodos cada una de las corrientes originales se descompone en la suma de varias corrientes perfectamente sinusoidales.

En el método de las componentes simétricas todas las corrientes, las originales y las de la descomposición, tienen la misma frecuencia (que en España normalmente será 50 Hz).

Por el contrario, en las series de Fourier cada armónico tiene una frecuencia diferente a la de los demás y múltiplo de la frecuencia de las corrientes de partida.

- En el método de las componentes simétricas cada corriente original es igual a la suma de tres corrientes sinusoidales: una del sistema de secuencia directa, otra del sistema de secuencia inversa y otra del sistema homopolar.

En las series de Fourier, en teoría, cada corriente original es igual a la suma de infinitos armónicos. En la práctica, este sumatorio se reduce únicamente a los armónicos de orden más pequeño, que son los realmente significativos. En nuestro caso, solamente se han tomado en consideración el primer y el tercer armónicos (que en España usualmente tendrán unas frecuencias de 50 Hz y 150 Hz, respectivamente).

Transformador trifásico de 3 columnas con conexión estrella-estrella en vacío

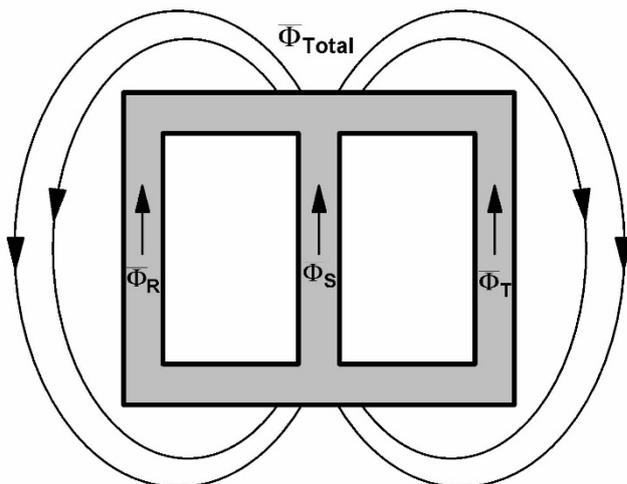


Fig. 8: Cuando en un transformador trifásico de tres columnas en vacío los flujos tienen terceros armónicos, sucede que la suma de los tres flujos de fase no es nula y el flujo total resultante (que es proporcional a los terceros armónicos de flujo) se debe cerrar por fuera del núcleo magnético y se encuentra con un camino de gran reluctancia

En este caso, el tercer armónico del flujo, que es homopolar, no tiene ninguna columna del núcleo magnético por donde cerrarse. Esto obliga a este flujo a circular a través del aire y de la cuba del transformador para cerrar su recorrido (Fig. 8). Pero, entonces, sucede que el tercer armónico del flujo tiene un camino de gran reluctancia, lo que provoca que este flujo sea ahora mucho más reducido que en el caso del banco de tres transformadores monofásicos o del transformador trifásico de cinco

columnas. De todo esto se deduce que ahora los terceros armónicos de las f.e.m.s de fase serán mucho más pequeños que en el caso anterior, incluso aunque el transformador se diseñe para trabajar en la zona de saturación.

Sin embargo, como este flujo de tercer armónico tenderá a circular por la cuba del transformador, que no está diseñada para ello, aparecerán unas pérdidas en el hierro adicionales en ella.

Transformación triángulo-estrella en vacío

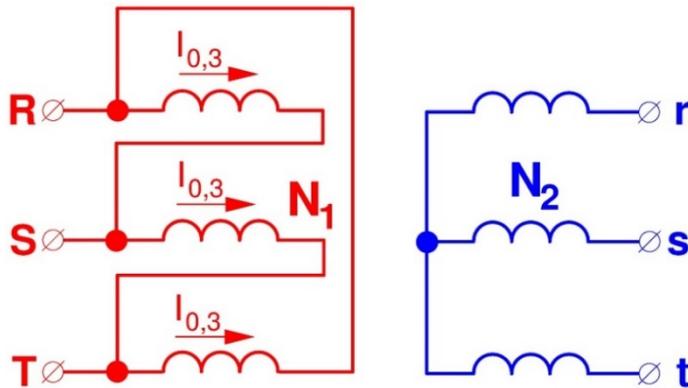


Fig. 9: Terceros armónicos de corriente en una transformación Dy en vacío

En una transformación de tensiones triángulo-estrella pueden circular corrientes homopolares de fase por el primario que se cierran dentro del triángulo (Fig. 9). En consecuencia, los flujos y las f.e.m.s son perfectamente sinusoidales, tanto cuando la transformación se realice mediante un banco de tres transformadores trifásicos como cuando se utilicen transformadores trifásicos de 3 o 5 columnas.

Aunque las corrientes de fase (dentro del triángulo) tengan terceros armónicos, las corrientes de línea carecen de ellos. Así, en fase R de la línea el tercer armónico de la corriente vale:

$$\bar{I}_{R 0,3} = \bar{I}_{RS 0,3} - \bar{I}_{TR 0,3} = 0 \quad (7)$$

ya que al tratarse de un sistema homopolar sucede que:

$$\bar{I}_{RS 0,3} = \bar{I}_{ST 0,3} = \bar{I}_{TR 0,3} (= \bar{I}_{0,3}) \quad (8)$$

Para este tipo de conexión, en la Fig. 9 se muestran los terceros armónicos de la corriente, los cuales únicamente circulan por dentro del triángulo. Además, existirán el resto de los armónicos de la corriente primaria -de los cuales solamente es significativo el primer armónico- que no se muestran en la Fig. 9. En esta figura y en las siguientes se va a suponer que el primario es el lado de alta tensión.

Transformación estrella-triángulo en vacío

Si el primario de una transformación de tensiones estrella-triángulo tiene su neutro aislado, en dicho primario no habrá terceros armónicos de corriente. Por lo tanto, en principio, se podría pensar que habrá terceros armónicos de flujo que originarán terceros armónicos de f.e.m. en las fases del secundario.

La conexión triángulo del secundario hace que estos terceros armónicos (homopolares) de la f.e.m. de fase queden conectados en serie y cortocircuitados. Luego, en vacío estas f.e.m.s provocan una circulación de terceros armónicos de corriente de fase que se cierran dentro del triángulo (no habrá, en consecuencia, terceros armónicos en las corrientes de línea), los cuales generan terceros armónicos de flujo que prácticamente anulan a los terceros armónicos del flujo inicial.

Por esta razón, tanto en los bancos de tres transformadores monofásicos como en los transformadores trifásicos de tres o cinco columnas con la conexión Yd, en vacío apenas aparecen terceros armónicos en los flujos y en las f.e.m.s y solamente surgen unas corrientes de tercer armónico (homopolares) de fase en el triángulo secundario que no afectan a las corrientes de línea (Fig. 10).

Es decir, en este tipo de conexión hay terceros armónicos de corriente por el interior del triángulo secundario y la corriente primaria contendrá el resto de los armónicos no múltiplos de 3 (de los cuales únicamente es significativo el primer armónico). Al existir un tercer armónico de corriente, aunque sea en el secundario, los flujos y las f.e.m.s y tensiones de fase prácticamente carecen de terceros armónicos y son sinusoidales.

En la Fig. 10 se muestran solamente los terceros armónicos de la corriente en este tipo de conexión. Además, existirán el resto de los armónicos, los cuales no se han mostrado en dicha figura.

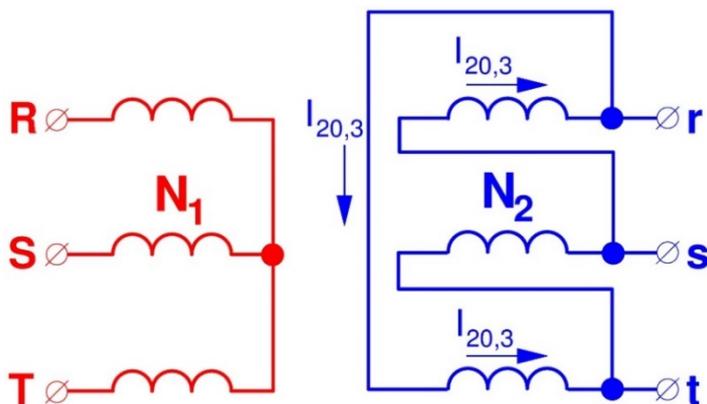


Fig. 10: Terceros armónicos de corriente en una transformación Yd en vacío

Transformación estrella-estrella con devanado terciario en triángulo en vacío

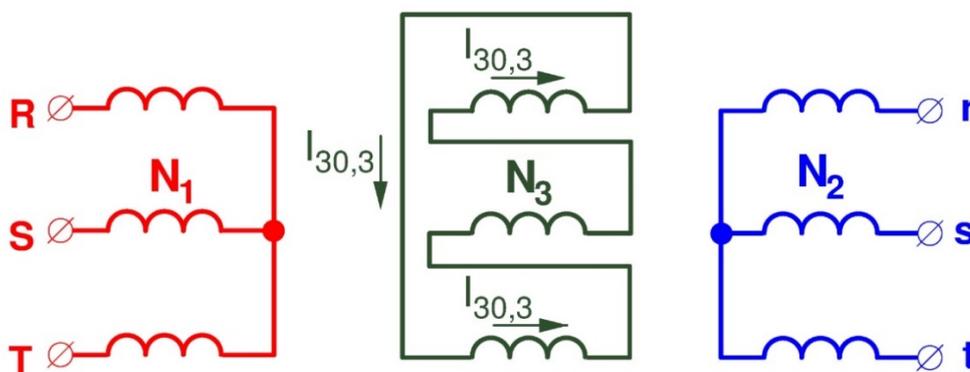
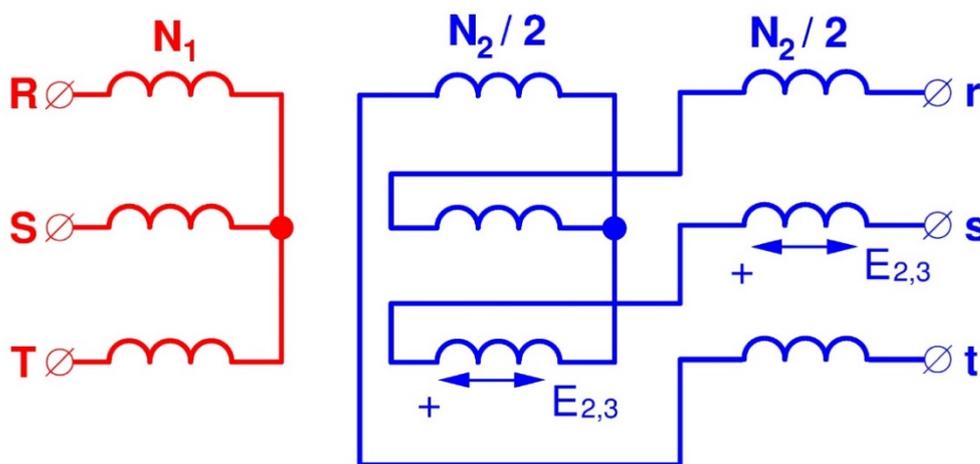


Fig. 11: Terceros armónicos de corriente en una transformación Yy con devanado terciario en vacío

Considérese ahora una transformación de tensiones estrella-estrella con un devanado terciario en triángulo y con el neutro primario aislado. Si esta transformación está funcionando en vacío sucede, al igual que en la transformación estrella-triángulo, que los terceros armónicos de corriente de fase que aparecen en el triángulo terciario prácticamente eliminan los terceros armónicos de flujo y se obtienen f.e.m.s de fase sinusoidales (Fig. 11).

Transformación estrella-zig-zag en vacío



(Las f.e.m.s $E_{2,3}$ de los semidevanados se anulan entre sí)

Fig. 12: Terceros armónicos de f.e.m. en una fase del secundario de una transformación Yz en vacío

En este apartado se va a analizar el funcionamiento en vacío de una transformación de tensiones con la conexión estrella-zig-zag. Al igual que en la transformación estrella-estrella, si el primario tiene el neutro aislado la corriente de vacío carece de tercer armónico y el flujo lo posee. Este tercer armónico de flujo induce terceros armónicos de f.e.m. en los semidevanados del zig-zag. Como cada fase del zig-zag consta de dos semidevanados conectados en oposición, las f.e.m.s homopolares (terceros armónicos) inducidas en cada uno se restan y se anulan. En consecuencia, las f.e.m.s fase-neutro del secundario en zig-zag no tienen tercer armónico (Fig. 12).

En la Fig. 12 se muestra solamente el tercer armónico de la f.e.m. inducida en cada semidevanado de una fase del zig-zag del secundario. En dicha fase existirá, además, el primer armónico de f.e.m., el cual no se ha mostrado en dicha figura.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] FRAILE MORA, J. 2015. *Máquinas eléctricas*. Madrid: Ibergarceta Publicaciones, S.L.
- [2] GRAINGER, J. J. y STEVENSON, W. D. 1996. *Análisis de Sistemas de Potencia*. Méjico: McGraw-Hill/Interamericana de México, S.A.
- [3] IVANOV-SMOLENSKI. 1984. *Máquinas eléctricas. Tomo 2*. Moscú: Editorial Mir.
- [4] KOSTENKO y PIOTROVSKI. 1979. *Máquinas eléctricas. Tomo II*. Moscú: Editorial Mir.
- [5] RAS OLIVA. 1998. *Transformadores de potencia, de medida y de protección*. Barcelona: Marcombo.

TRANSFORMADORES EN PARALELO

Miguel Angel Rodríguez Pozueta

Condiciones para que varios transformadores se puedan conectar en paralelo

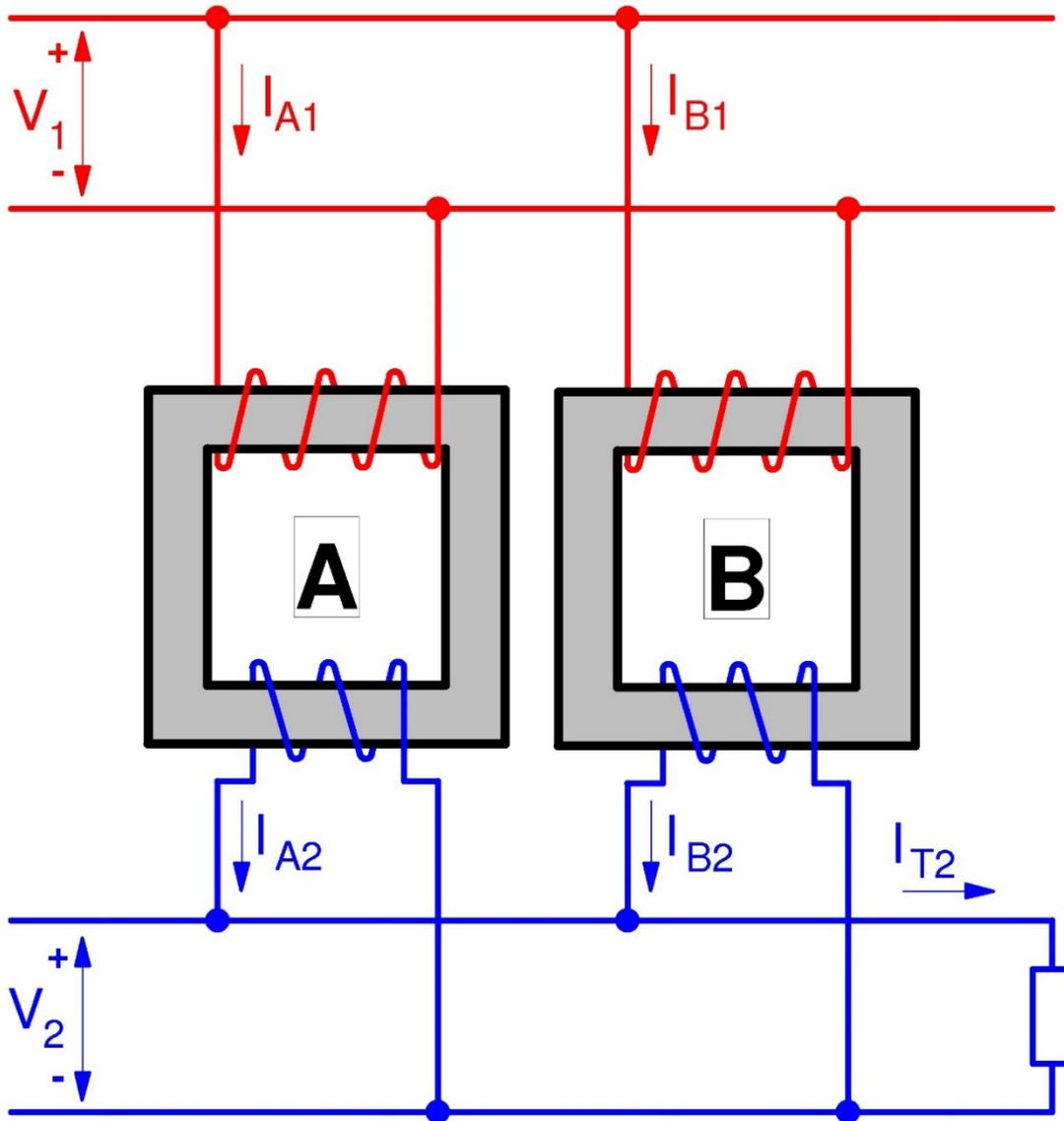


Fig. 0: Dos transformadores monofásicos (A y B) conectados en paralelo

Cuando varios transformadores se conectan en paralelo se unen entre sí todos los primarios, por una parte, y todos los secundarios por otra (Fig. 0). Esto obliga a que todos los transformadores en paralelo tengan las mismas tensiones (tanto en módulo como en argumento) primaria y secundaria. De esto se deduce que una condición que se debe exigir siempre para que varios transformadores puedan conectarse en paralelo es que tengan las mismas tensiones asignadas en el primario y en el secundario; es decir, la misma relación de transformación.

TRANSFORMADORES EN PARALELO

En el caso de que se trate de transformadores trifásicos conectados en paralelo, no sólo es necesario garantizar que los valores eficaces de las tensiones asignadas primaria y secundaria (de línea) de todos los transformadores sean iguales, sino también sus argumentos. Esto indica que las condiciones necesarias para que varios transformadores trifásicos se puedan conectar en paralelo son que tengan la misma relación de transformación de tensiones m_T y el mismo índice horario.

El hecho de que todos los transformadores puestos en paralelo tengan iguales tensiones primaria y secundaria significa que, cuando se reducen los secundarios al primario, en todos los transformadores en paralelo se produce siempre la misma caída de tensión. De esto se puede deducir (como se demuestra en el siguiente apartado de este texto) que para m transformadores en paralelo se verifica la siguiente relación:

$$C_A \cdot \varepsilon_{Acc} = C_B \cdot \varepsilon_{Bcc} = \dots = C_M \cdot \varepsilon_{Mcc}$$

Por lo tanto, interesa que las tensiones relativas de cortocircuito ε_{cc} de todos los transformadores sean iguales para que queden igualmente cargados y se verifique siempre que:

$$C_A = C_B = \dots = C_M$$

Así es posible conseguir que todos puedan llegar a proporcionar simultáneamente su potencia asignada (todos con $C = 1$) sin sobrecargar ninguno.

En resumen, las condiciones que obligatoriamente deben cumplir los transformadores que se desean conectar en paralelo son éstas:

- * Transformadores monofásicos: Iguals relaciones de transformación m .
- * Transformadores trifásicos: Iguals relaciones de transformación de tensiones m_T e iguals índices horarios.

Además, es recomendable que los transformadores a conectar en paralelo (mono o trifásicos) también verifiquen la condición de igualdad de tensiones relativas de cortocircuito ε_{cc} .

Ecuación fundamental para transformadores en paralelo

Cuando varios transformadores están en paralelo se conectan entre sí todos los devanados primarios por una parte y todos los devanados secundarios por otra. Esto obliga a que todos los transformadores tengan la misma tensión primaria y también la misma tensión secundaria. En consecuencia, en todos los transformadores puestos en paralelo se produce la misma caída de tensión. De este hecho se van a obtener unas relaciones muy interesantes, como se va a comprobar seguidamente.

Considérense dos transformadores, A y B, conectados en paralelo y, por lo tanto, ambos con las mismas tensiones asignadas primaria y secundaria. Reduciendo al primario los secundarios de ambas máquinas y utilizando sus circuitos equivalentes aproximados se obtiene el circuito equivalente de la Fig. 1.

TRANSFORMADORES EN PARALELO

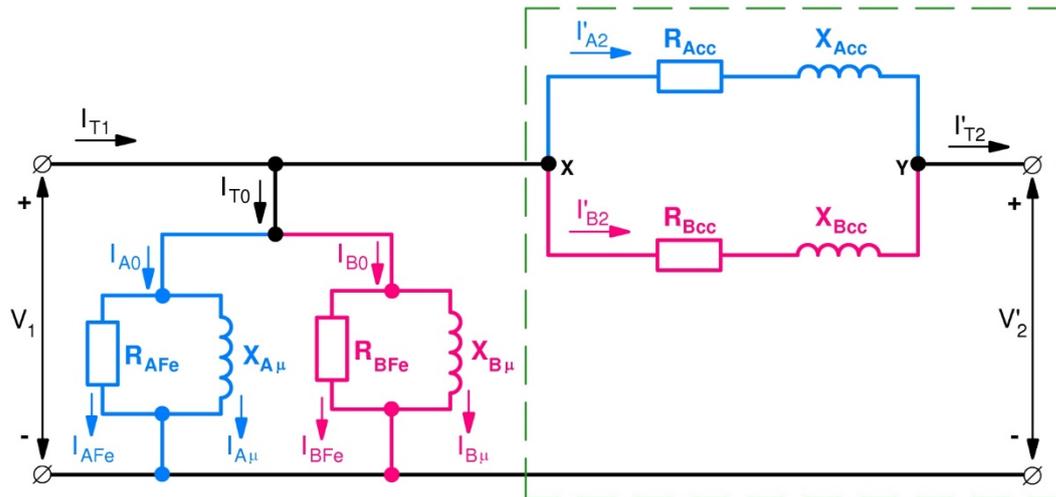


Fig. 1: Circuito equivalente de dos transformadores, A y B, puestos en paralelo

En esta figura se han utilizado los subíndices A y B para designar a las magnitudes de los transformadores A y B, respectivamente, y el subíndice T para las corrientes totales del conjunto de los dos transformadores en paralelo. Las tensiones V_1 y V'_2 son comunes a ambos aparatos.

Para el estudio de la caída de tensión basta con utilizar la parte del circuito equivalente de la Fig. 1 que está encerrada dentro de la línea de trazos. En resumen, se va a trabajar con el circuito equivalente de la Fig. 2.

Por otra parte, en muchas ocasiones, a poco importante que sea la corriente que circula por el secundario, se podrá desprestigiar la corriente de vacío, I_{T0} , en el circuito equivalente de la Fig. 2. Esto significa el considerar que se verifica que

$$\text{Si } I_{T0} \ll I'_{T2} \rightarrow \bar{I}_{T1} \approx \bar{I}'_{T2}$$

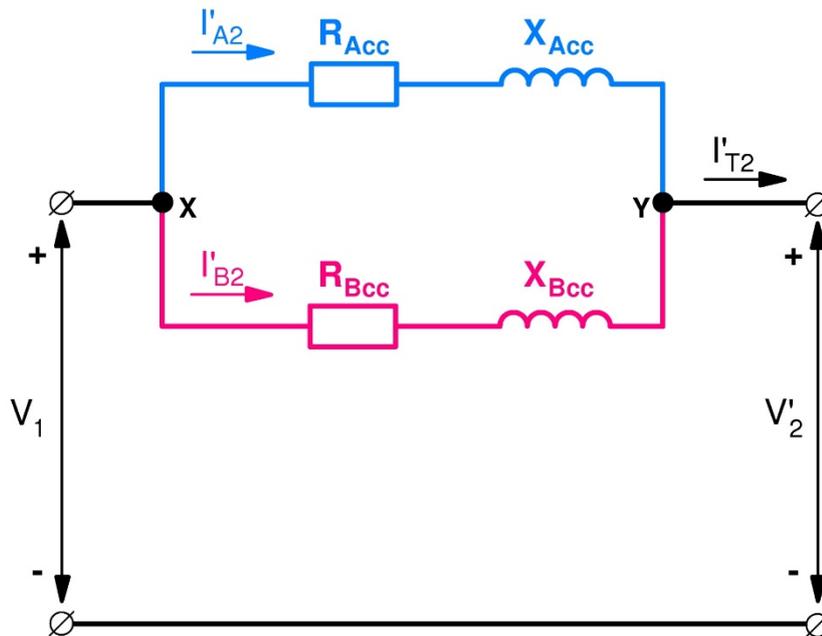


Fig. 2: Circuito equivalente simplificado de dos transformadores, A y B, en paralelo

En la Fig. 2 es fácil comprobar que la caída de tensión entre los nudos X e Y se puede calcular tanto como la caída de tensión en la impedancia de cortocircuito del transformador A como en la del B:

$$\boxed{\bar{V}_{XY} = \bar{V}_1 - \bar{V}'_2 = \bar{Z}_{Acc} \cdot \bar{I}'_{A2} = \bar{Z}_{Bcc} \cdot \bar{I}'_{B2}} \quad (1)$$

Es sabido que el triángulo de impedancias de cortocircuito de un transformador es el representado en la Fig. 3.

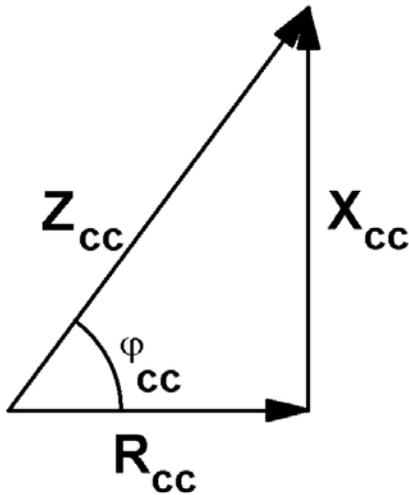


Fig. 3: Triángulo de impedancias de cortocircuito de un transformador

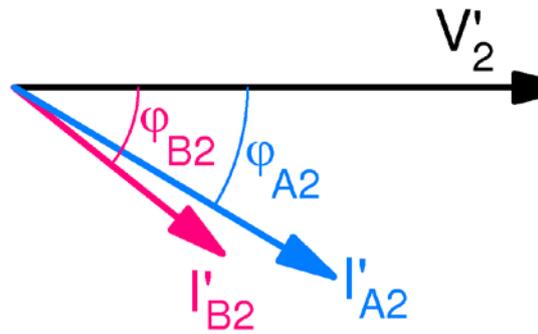


Fig. 4: Diagrama fasorial de dos transformadores en paralelo

Luego, se tiene que:

$$\bar{Z}_{Acc} = Z_{Acc} \angle \varphi_{Acc}; \quad \bar{Z}_{Bcc} = Z_{Bcc} \angle \varphi_{Bcc}$$

Por otra parte, si se toma el fasor de tensión secundaria \bar{V}'_2 como referencia, se obtiene el diagrama fasorial de la Fig. 4. De este diagrama se deduce lo siguiente:

$$\bar{I}'_{A2} = I'_{A2} \angle -\varphi_{A2}; \quad \bar{I}'_{B2} = I'_{B2} \angle -\varphi_{B2}$$

Luego, la expresión (1) se puede poner así:

$$\left(Z_{Acc} \angle \varphi_{Acc} \right) \cdot \left(I'_{A2} \angle -\varphi_{A2} \right) = \left(Z_{Bcc} \angle \varphi_{Bcc} \right) \cdot \left(I'_{B2} \angle -\varphi_{B2} \right) \quad (2)$$

Trabajando por separado con los módulos y los argumentos de las magnitudes complejas de la ecuación (2) se obtienen las siguientes conclusiones:

* El módulo del producto de dos complejos es igual al producto de sus módulos. Luego, de (2) se deduce que:

TRANSFORMADORES EN PARALELO

$$Z_{Acc} \cdot I'_{A2} = Z_{Bcc} \cdot I'_{B2} \quad (3)$$

Recuérdese que el índice de carga C verifica lo siguiente

$$C = \frac{I'_2}{I_{1N}} \rightarrow I'_2 = C \cdot I_{1N}$$

y que la tensión relativa de cortocircuito ε_{cc} es así:

$$\varepsilon_{cc} = \frac{Z_{cc} I_{1N}}{V_{1N}} 100 \rightarrow Z_{cc} = \frac{V_{1N}}{I_{1N}} \cdot \frac{\varepsilon_{cc}}{100}$$

De todo lo anterior, se obtiene que la relación (3) se convierte en

$$\left(\frac{V_{1N}}{I_{A1N}} \cdot \frac{\varepsilon_{Acc}}{100} \right) \cdot (C_A \cdot I_{A1N}) = \left(\frac{V_{1N}}{I_{B1N}} \cdot \frac{\varepsilon_{Bcc}}{100} \right) \cdot (C_B \cdot I_{B1N})$$

$$\boxed{C_A \cdot \varepsilon_{Acc} = C_B \cdot \varepsilon_{Bcc}} \quad (4)$$

El producto $C \cdot \varepsilon_{cc}$ toma el mismo valor para todos los transformadores puestos en paralelo. Esta es la ecuación fundamental que permitirá el estudio de transformadores conectados en paralelo.

* Por otra parte, el argumento del producto de dos complejos es igual a la suma de sus argumentos. Luego, de (2) se deduce que:

$$\varphi_{Acc} + (-\varphi_{A2}) = \varphi_{Bcc} + (-\varphi_{B2}) \rightarrow \boxed{\varphi_{B2} - \varphi_{A2} = \varphi_{Bcc} - \varphi_{Acc}} \quad (5)$$

Potencia máxima total

En el caso de que las tensiones relativas de cortocircuito de los transformadores no sean iguales sucede que:

- * Los transformadores están desigualmente cargados. Según se desprende de la relación (4), el transformador más cargado (el más "duro"), es decir, el que tiene un índice de carga mayor, es aquel cuya tensión relativa de cortocircuito ε_{cc} es menor. Obviamente interesa que el transformador más cargado sea el de mayor potencia asignada para obtener una mayor potencia máxima total.
- * Sea J el transformador más cargado. Si no se desea sobrecargar ninguno de los transformadores, la potencia máxima que debe proporcionar cada transformador se obtendrá cuando el transformador más cargado J proporcione su potencia asignada, es decir, cuando su índice de carga valga la unidad. Luego:

$$\left. \begin{array}{l} C_J = 1 \\ C_A \cdot \varepsilon_{Acc} = C_J \cdot \varepsilon_{Jcc} \end{array} \right\} C_A \cdot \varepsilon_{Acc} = \varepsilon_{Jcc} \rightarrow C_A = \frac{\varepsilon_{Jcc}}{\varepsilon_{Acc}}$$

TRANSFORMADORES EN PARALELO

Es decir, la máxima potencia que debe suministrar el transformador A se calculará mediante la siguiente fórmula:

$$S_A = \frac{\varepsilon_{Jcc}}{\varepsilon_{Acc}} S_{AN}$$

Normalmente los transformadores tienen ángulos φ_{cc} muy similares, por lo que de la expresión (5) se deduce lo siguiente:

$$\varphi_{Acc} \approx \varphi_{Bcc} \rightarrow \varphi_{B2} - \varphi_{A2} = \varphi_{Bcc} - \varphi_{Acc} \approx 0$$

$$\boxed{\varphi_{A2} \approx \varphi_{B2}}$$

Se observa, pues, que las corrientes que circulan por los transformadores en paralelo prácticamente están en fase. Por ello no se comete un error apreciable al sumarlas aritméticamente y no vectorialmente. Es decir, se puede aceptar que se cumple que:

$$I'_{T2} \approx I'_{A2} + I'_{B2} + \dots + I'_{M2}$$

Luego, también se cumple que:

$$S_T \approx S_A + S_B + \dots + S_M \quad (6)$$

Por consiguiente, la máxima potencia que pueden proporcionar los transformadores en paralelo sin sobrecargar ninguno de ellos es:

$$S_{TN} \approx \frac{\varepsilon_{Jcc}}{\varepsilon_{Acc}} S_{AN} + \frac{\varepsilon_{Jcc}}{\varepsilon_{Bcc}} S_{BN} + \dots + \frac{\varepsilon_{Jcc}}{\varepsilon_{Mcc}} S_{MN} \quad (7)$$

donde J es el transformador más cargado (es decir, el de menor tensión relativa de cortocircuito ε_{cc}).

En el caso de que no se pudiera aceptar que $\varphi_{A2} \approx \varphi_{B2}$ es preciso operar con complejos y la expresión anterior se convierte en

$$S_{TN} \approx \left| \frac{\bar{\varepsilon}_{Jcc}}{\varepsilon_{Acc}} S_{AN} + \frac{\bar{\varepsilon}_{Jcc}}{\varepsilon_{Bcc}} S_{BN} + \dots + \frac{\bar{\varepsilon}_{Jcc}}{\varepsilon_{Mcc}} S_{MN} \right|$$

donde $|\cdot|$ es la operación de calcular el módulo de un complejo y el parámetro $\bar{\varepsilon}_{cc}$ es de esta manera:

$$\bar{\varepsilon}_{cc} = \varepsilon_{cc} \left| \varphi_{cc} \right| = \overline{\varepsilon_{Rcc}} + j \overline{\varepsilon_{Xcc}} = \frac{I_{IN} \cdot \overline{Z_{cc}}}{V_{IN}} 100$$

Ejemplo:

Dos transformadores trifásicos, A y B, de 12 000/3000 V y 50 Hz están conectados en paralelo. El transformador A es de 800 kVA, tiene la conexión Yd5 y su tensión relativa de cortocircuito es 4%. El transformador B es de 500 kVA, tiene la conexión Dy5 y su tensión relativa de cortocircuito es 5%.

- a) Calcular la máxima potencia aparente (S_{TN}) que puede proporcionar el conjunto de estos dos transformadores en paralelo sin sobrecargar ninguno de ellos.
- b) Estos transformadores están alimentando una carga que demanda 810 kW con factor de potencia 0,9 inductivo. Calcular la potencia aparente que suministra cada uno de ellos.

Resumen de datos:

$m_T = 12\,000/3000\text{ V}$	$f = 50\text{ Hz}$		
Transformador A:	Yd5	$S_{AN} = 800\text{ kVA}$	$\epsilon_{Acc} = 4\%$
Transformador B:	Dy5	$S_{BN} = 500\text{ kVA}$	$\epsilon_{Bcc} = 5\%$
Carga total:	810 kW	$\cos \phi_{2T} = 0,9\text{ inductivo}$	

Resolución:

Obsérvese que ambos transformadores tienen la misma relación de transformación de tensiones (m_T) y el mismo índice horario (5), aunque las formas de conexión sean distintas (el transformador A es estrella - triángulo y el transformador B es triángulo - estrella). Por lo tanto, cumplen las condiciones necesarias para poderse acoplar en paralelo.

- a) El transformador que quedará más cargado será el A por ser el que tiene una tensión de cortocircuito menor ($\epsilon_{Acc} < \epsilon_{Bcc}$). Suponiendo que los ángulos ϕ_{cc} de ambos transformadores tienen valores parecidos se pueden sumar aritméticamente las potencias aparentes de estos transformadores sin cometer un error excesivo.

Por lo tanto, aplicando la relación (7), donde ahora el transformador más cargado “J” es el transformador “A”, queda lo siguiente:

$$S_{TN} = S_{AN} + \frac{\epsilon_{Acc}}{\epsilon_{Bcc}} S_{BN} = 800 + \frac{4}{5} 500 = 1200\text{ kVA}$$

Al aplicar la fórmula anterior hay que tener cuidado de expresar todas las potencias con la misma unidad (kVA en este caso).

La máxima potencia que pueden proporcionar ambos transformadores en paralelo sin sobrecargar ninguno de ellos vale $S_{TN} = 1200\text{ kVA}$.

Nótese que al no cumplirse la condición recomendable de igualdad de las tensiones relativas de cortocircuito ϵ_{cc} , la potencia máxima S_{TN} es inferior a la suma de las potencias asignadas de los dos transformadores conectados en paralelo ($S_{AN} + S_{BN} = 1300\text{ kVA} > 1200\text{ kVA} = S_{TN}$), con lo que no se puede aprovechar íntegramente su capacidad de suministrar potencia.

TRANSFORMADORES EN PARALELO

Es más, en un caso totalmente desfavorable la potencia S_{TN} puede ser inferior a la potencia asignada de uno de los transformadores, dándose la paradoja que con uno sólo de los transformadores se puede proporcionar más potencia que con varios en paralelo.

Así, si se tuvieran dos transformadores en paralelo iguales a los del enunciado de este ejemplo, salvo que las tensiones relativas de cortocircuito fueran $\varepsilon_{Acc} = 10\%$ y $\varepsilon_{Bcc} = 2\%$, sucedería, según relación (7), que la potencia S_{TN} vale 660 kVA; lo cual es inferior a la potencia asignada del transformador A ($S_{AN} = 800$ kVA). En este caso el transformador A funcionando solo podría suministrar más potencia que acoplado en paralelo con el transformador B.

- b) Como en el enunciado la potencia que consume la carga viene expresada en kW se trata de la potencia activa total en el secundario P_{2T} . Por lo tanto, la potencia aparente total vale:

$$S_T = \frac{P_{2T}}{\cos \phi_{2T}} = \frac{810 \text{ kW}}{0,9} = 900 \text{ kVA}$$

Como esta potencia es inferior a S_{TN} estos transformadores podrán suministrarla sin sobrecargar ninguno de ellos.

Las relaciones (4) y (7) permiten escribir lo siguiente:

$$\begin{cases} C_A \cdot \varepsilon_{Acc} = C_B \cdot \varepsilon_{Bcc} \\ S_A + S_B = S_T \end{cases}$$

Modificando la primera de las dos ecuaciones anteriores se obtiene este nuevo sistema de ecuaciones

$$\begin{cases} \frac{S_A}{S_{AN}} \cdot \varepsilon_{Acc} = \frac{S_B}{S_{BN}} \cdot \varepsilon_{Bcc} \\ S_A + S_B = S_T \end{cases} \rightarrow \begin{cases} \frac{S_A}{800} \cdot 4 = \frac{S_B}{500} \cdot 5 \\ S_A + S_B = 900 \end{cases}$$

La resolución de este sistema da los siguientes valores: $S_A = 600$ kVA y $S_B = 300$ kVA.

En el sistema de ecuaciones anterior hay que tener cuidado de utilizar la misma unidad para todas las potencias (kVA en este caso).

Cuando la carga demanda a los dos transformadores en paralelo una potencia de 810 kW con un factor de potencia 0,9 inductivo, el transformador A suministra $S_A = 600$ kVA y el transformador B proporciona $S_B = 300$ kVA.

Transformador equivalente a varios en paralelo

Un conjunto de M transformadores conectados en paralelo alimentando cargas equilibradas equivale a un transformador de estas características:

- * Igual relación de transformación de tensiones m_T e índice horario que todos los transformadores en paralelo (si todos los transformadores no tuvieran los mismos m_T e índice horario no podrían conectarse en paralelo).
- * En el caso trifásico la conexión del transformador equivalente puede ser cualquiera. Usualmente se considera que el primario está conectado en estrella.
- * La potencia de pérdidas en el hierro del transformador equivalente es igual a la suma de las pérdidas en el hierro de los transformadores puestos en paralelo. Análogamente, la corriente de vacío del transformador equivalente es igual a la suma vectorial de las corrientes de vacío de los transformadores conectados en paralelo.
- * La potencia asignada del transformador equivalente es la potencia máxima total S_{TN} .
- * La tensión relativa de cortocircuito ε_{Tcc} del transformador equivalente se obtiene partiendo de que las caídas de tensión en todos los transformadores en paralelo y en el transformador equivalente son iguales. Por lo tanto, se cumplirá la siguiente relación entre el transformador equivalente T y el más cargado J:

$$\bar{Z}_{Tcc} \cdot \bar{I}'_{T2} = \bar{Z}_{Jcc} \cdot \bar{I}'_{J2}$$

que se convierte en

$$\varepsilon_{Tcc} \cdot C_T = \varepsilon_{Jcc} \cdot C_J$$

Ahora bien, cuando el transformador más cargado J proporciona la totalidad de su potencia asignada ($C_J = 1$), el conjunto de todos transformadores en paralelo suministra la potencia S_{TN} y $C_T = 1$. En consecuencia,

$$C_J = 1 \rightarrow C_T = 1 \rightarrow \boxed{\varepsilon_{Tcc} = \varepsilon_{Jcc}}$$

La tensión relativa de cortocircuito del transformador equivalente a varios en paralelo es igual a la del transformador más cargado (de menor tensión relativa de cortocircuito).

- * En el caso de que los ángulos φ_{cc} de todos los transformadores puestos en paralelo sean parecidos, se puede suponer que $\varphi_{Tcc} \approx \varphi_{Jcc}$ y

$$\bar{\varepsilon}_{Tcc} = \varepsilon_{Tcc} \left| \varphi_{Tcc} \right| = \varepsilon_{Jcc} \left| \varphi_{Jcc} \right| = \bar{\varepsilon}_{Jcc}$$

$$\bar{\varepsilon}_{Tcc} = \bar{\varepsilon}_{Jcc} \rightarrow \boxed{\varepsilon_{TRcc} = \varepsilon_{JRcc} ; \varepsilon_{TXcc} = \varepsilon_{JXcc}}$$

De todos modos, es más preciso calcular los parámetros ε_{TRcc} y ε_{TXcc} como se indica a continuación.

TRANSFORMADORES EN PARALELO

El valor del parámetro ε_{TRcc} será tal que haga que las pérdidas en el cobre asignadas del transformador equivalente sean iguales a la suma de las pérdidas en el cobre del conjunto de los transformadores en paralelo cuando están proporcionando la potencia S_{TN} .

En estas condiciones uno de los transformadores en paralelo, el K, tiene estas pérdidas en el cobre:

$$P_{KCu} = C_K^2 P_{KCuN} = \left(\frac{\varepsilon_{Jcc}}{\varepsilon_{Kcc}} \right)^2 \cdot \left(\frac{\varepsilon_{KRcc}}{100} S_{KN} \right)$$

Luego:

$$P_{TCuN} = \frac{\varepsilon_{TRcc}}{100} S_{TN} = \frac{\varepsilon_{Jcc}^2}{100} \left[\frac{\varepsilon_{ARcc}}{\varepsilon_{Acc}^2} S_{AN} + \frac{\varepsilon_{BRcc}}{\varepsilon_{Bcc}^2} S_{BN} + \dots + \frac{\varepsilon_{MRcc}}{\varepsilon_{Mcc}^2} S_{MN} \right]$$

Por lo tanto, se puede obtener el parámetro ε_{TRcc} despejándolo de la siguiente expresión

$$\frac{\varepsilon_{TRcc}}{\varepsilon_{Jcc}^2} S_{TN} = \frac{\varepsilon_{ARcc}}{\varepsilon_{Acc}^2} S_{AN} + \frac{\varepsilon_{BRcc}}{\varepsilon_{Bcc}^2} S_{BN} + \dots + \frac{\varepsilon_{MRcc}}{\varepsilon_{Mcc}^2} S_{MN}$$

Y, teniendo en cuenta que $\varepsilon_{Tcc} = \varepsilon_{Jcc}$, se deduce que

$$\varepsilon_{TXcc} = \sqrt{\varepsilon_{Jcc}^2 - \varepsilon_{TRcc}^2}$$

TRANSFORMADORES DE MEDIDA Y DE PROTECCIÓN

Miguel Angel Rodríguez Pozueta

DESCRIPCIÓN

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. 1.

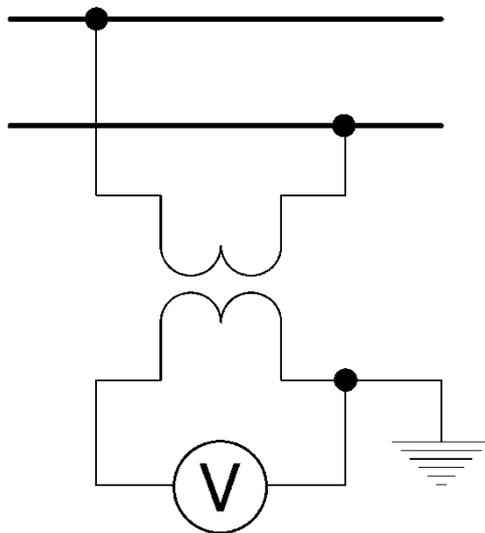


Fig. 1: Transformador de tensión

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.

Análogamente, para la medida de corrientes alternas elevadas o de corrientes alternas en circuitos de alta tensión se utilizan **transformadores de intensidad o de corriente** conectados como se indica en la Fig. 2.

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.

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

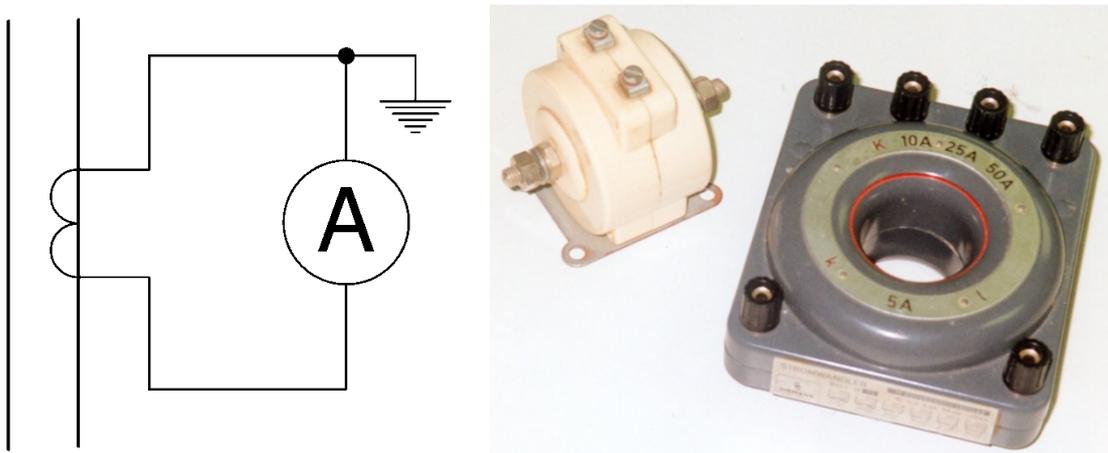


Fig. 2: Transformador de intensidad

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.

Los *transformadores de intensidad mixtos* incluyen en un mismo dispositivo un transformador de intensidad de medida y otro de protección.

Los *transformadores combinados* incluyen en un mismo aparato un transformador de tensión y otro de intensidad.

MAGNITUDES CARACTERÍSTICAS DE LOS TRANSFORMADORES DE MEDIDA Y DE PROTECCIÓN

Transformadores de tensión

Las características de los transformadores de tensión están recogidas en las normas UNE-EN 61869-1 y UNE-EN 61869-3.

El *devanado primario* de un transformador de tensión se conecta a la tensión V_1 a medir y el *devanado secundario* alimenta con una tensión V_2 a los aparatos de medida o de protección. Los valores asignados de estas tensiones son, respectivamente, V_{1N} y V_{2N} . Según las normas, en Europa la tensión secundaria asignada V_{2N} toma estos valores: 100 y 110 V.

El cociente entre las dos tensiones asignadas define la relación de transformación asignada α_v del transformador de tensión:

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

El error de relación ε_v cuando el transformador de tensión funciona con una carga dada es debido a que la tensión V_1 que está midiendo no es exactamente igual a la que se obtiene aplicando la relación de transformación asignada α_v a la tensión V_2 que proporciona. Este error se expresa en tanto por ciento (%) y en un transformador de tensión se define así:

$$\varepsilon_v = \frac{(\alpha_v \times V_2) - V_1}{V_1} 100 (\%) \quad (2)$$

El error de fase o desfase $\Delta\phi_v$ solo es válido para tensiones sinusoidales y es la diferencia entre los ángulos de fase de los fasores de tensión V_1 y V_2 . Esta magnitud se mide en minutos o en centiradianes y tiene signo positivo cuando el fasor V_2 está adelantado con respecto al fasor V_1 . Este error no tiene transcendencia cuando sólo se miden tensiones, pero influye cuando se miden ángulos de fase, potencias, energías, ...

La potencia de precisión es la máxima potencia aparente que puede conectarse al secundario de un transformador de tensión (incluyendo también la potencia disipada en los hilos de conexión) para la cual los errores de medida se conservan aún dentro de los límites fijados por su clase de precisión (esta magnitud se define en el siguiente párrafo). En un transformador trifásico la potencia de precisión es la de una fase.

La clase de precisión asignada es una indicación normalizada de los errores máximos (de relación y de desfase) que debe respetar un transformador de tensión cuando funciona dentro de los márgenes especificados por las normas. Es decir, para una clase de precisión asignada concreta las normas indican los límites de los errores que comete el transformador de tensión cuando las mediciones que se realizan con él están dentro de unos ciertos márgenes de tensión, de potencia y de frecuencia.

En los transformadores de tensión de medida, la clase de precisión se designa mediante un número que se denomina índice de clase y que es igual al error de relación a la potencia de precisión y a la tensión asignada.

Ejemplo:

Un transformador de tensión de medida de 1000/110 V, clase 0,1 y potencia de precisión 5 VA, según la norma UNE-EN 61869-3 no debe cometer un error de relación superior al 0,1% y un error de desfase superior a ± 5 minutos cuando la tensión a medir está entre el 80 y el 120% de la tensión asignada (entre 800 y 1200 V en este caso) y cuando la potencia que suministra es igual o inferior a la potencia de precisión (5 VA en este caso) con factor de potencia 1.

Transformadores de intensidad

Las características de los transformadores de intensidad están recogidas en las normas UNE-EN 61869-1 y UNE-EN 61869-2.

El *devanado primario* de un transformador de intensidad se conecta a la corriente I_1 a medir y el *devanado secundario* alimenta con una corriente I_2 a los aparatos de medida o de protección. Los valores asignados de estas corrientes son, respectivamente, I_{1N} y I_{2N} . Según las normas, la intensidad secundaria asignada I_{2N} toma estos valores: 1 y 5 A.

El cociente entre las dos corrientes asignadas define la relación de transformación asignada α_i del transformador de intensidad:

$$\alpha_i = \frac{I_{1N}}{I_{2N}} \quad (3)$$

El error de relación ε_i cuando el transformador de intensidad funciona con una carga dada se expresa en tanto por ciento (%) y se define así:

$$\varepsilon_i = \frac{(\alpha_i \times I_2) - I_1}{I_1} 100 (\%) \quad (4)$$

El error de fase o desfase $\Delta\varphi_i$ solo es válido para corrientes sinusoidales y es la diferencia entre los ángulos de fase de los fasores de intensidad I_1 e I_2 . Esta magnitud se mide en minutos o en centiradianes y tiene signo positivo cuando el fador I_2 está adelantado con respecto al fador I_1 . Este error no tiene transcendencia cuando sólo se miden corrientes, pero influye cuando se miden ángulos de fase, potencias, energías, ...

Análogamente a los transformadores de tensión, la potencia de precisión es la máxima potencia aparente que puede conectarse al secundario de un transformador de intensidad para la cual los errores de medida se conservan aún dentro de los límites fijados por su clase de precisión. En un transformador trifásico la potencia de precisión es la de una fase.

La clase de precisión asignada es una indicación normalizada de los errores máximos (de relación y de desfase) que debe respetar un transformador de intensidad cuando funciona dentro de los márgenes especificados por las normas.

En los transformadores de intensidad de medida, la clase de precisión se designa mediante un número que es igual al error de relación a la potencia de precisión y a la corriente asignada.

Ejemplo:

Según la norma UNE-EN 61869-2, un transformador de intensidad de medida de 500/5 A, clase 0,2 y potencia de precisión 2,5 VA, siempre que la potencia que suministre esté comprendida entre el 25% y el 100% de la potencia de precisión asignada (entre 0,625 y 2,5 VA en este caso) con factor de potencia 1, no debe cometer unos errores de relación y de desfase superiores a los siguientes valores:

- 0,75% y ± 30 minutos cuando mide una corriente igual al 5% de la asignada (25 A en este caso).
- 0,35% y ± 15 minutos cuando mide una corriente igual al 20% de la asignada (100 A en este caso).
- 0,2% y ± 10 minutos cuando mide una corriente igual al 100% de la asignada (500 A en este caso).
- 0,2% y ± 10 minutos cuando mide una corriente igual al 120% de la asignada (600 A en este caso).

BIBLIOGRAFÍA GLOBAL PARA TRANSFORMADORES

- [1] AENOR. 1998. *Norma UNE-EN 60076-1: Transformadores de potencia. Parte 1: Generalidades*. Madrid. AENOR.
- [2] AENOR. 2013. *Norma UNE-EN 61869-1: Transformadores de medida. Parte 1: Requisitos generales*. Madrid. AENOR.
- [3] AENOR. 2013. *Norma UNE-EN 61869-2: Transformadores de medida. Parte 2: Requisitos adicionales para los transformadores de intensidad*. Madrid. AENOR.
- [4] AENOR. 2012. *Norma UNE-EN 61869-3: Transformadores de medida. Parte 3: Requisitos adicionales para los transformadores de tensión inductivos*. Madrid. AENOR.
- [5] CHAPMAN. 2005. *Máquinas eléctricas*. Madrid: McGraw-Hill Interamericana.
- [6] CORRALES MARTIN. 1982. *Cálculo Industrial de máquinas eléctricas (2 tomos)*. Barcelona: Marcombo.
- [7] EQUIPO EPS ZARAGOZA. 1981. *Tecnología de Electricidad 4 instalaciones y líneas*. Barcelona: EDEBE.
- [8] FITZGERALD, KINGSLEY Y UMANS. 2004. *Máquinas eléctricas*. Madrid: McGraw-Hill Interamericana.
- [9] FRAILE MORA, J. 2008. *Máquinas eléctricas*. Madrid: McGraw-Hill Interamericana.
- [10] FRAILE MORA y GARCÍA GUTIÉRREZ. *Prácticas de Electrotecnia*. Madrid: Departamento de Publicaciones de la E.T.S.I.C.C.P. de Madrid.
- [11] GOS, M. R.; TALPONE, H. J. y RAITI, O. S. *Transformadores de instrumentos*. Universidad Tecnológica Nacional. Facultad Regional de La Plata. Disponible en esta dirección web: <http://www.frlp.utn.edu.ar/materias/tydee/moduloii.pdf>.
- [12] GRAINGER, J. J. y STEVENSON, W. D. 1996. *Análisis de Sistemas de Potencia*. Méjico: McGraw-Hill/Interamericana de México, S.A.
- [13] 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.
- [14] IVANOV-SMOLENSKI. 1984. *Máquinas eléctricas. Tomo 2*. Moscú: Editorial Mir.
- [15] KOSTENKO y PIOTROVSKI. 1979. *Máquinas eléctricas. Tomo II*. Moscú: Editorial Mir.
- [16] LANGSDORF. 1977. *Teoría de las máquinas de c.a.* Méjico: McGraw-Hill.
- [17] RAS OLIVA. 1998. *Transformadores de potencia, de medida y protección*. Barcelona: Marcombo.
- [18] SANZ FEITO. 2002. *Máquinas eléctricas*. Madrid: Pearson Educación.
- [19] SUÁREZ CREO, J. M. Y MIRANDA BLANCO, B. N. 2006. *Máquinas eléctricas. Funcionamiento en régimen permanente*. Santiago de Compostela. Tórculo Edicions, S.L.