

FUNDAMENTOS DE INGENIERÍA ELÉCTRICA

*José Francisco Gómez
González*

Benjamín González Díaz

*María de la Peña Fabiani
Bendicho*

Ernesto Pereda de Pablo



**Universidad
de La Laguna**

**Departamento de
Ingeniería Industrial**



Tema 7: Transformador



PUNTOS OBJETO DE ESTUDIO

- ▶ Introducción
- ▶ Transformador ideal
- ▶ Transformador real
- ▶ Ensayos de los transformadores
- ▶ Rendimiento, régimen de carga y regulación de voltaje
- ▶ Autotransformador
- ▶ Transformador trifásico

Introducción

- ▶ CLASIFICACIÓN DE LAS MÁQUINAS ELÉCTRICAS:
- ▶ Sin elementos móviles: estáticas (transformadores)
- ▶ Con elementos móviles: dinámicas o rotatorias
 - ▶ Si convierten potencia eléctrica en mecánica: motores
 - ▶ Si convierten potencia mecánica en eléctrica: generadores

Definición de transformador

- ▶ Convierten potencia eléctrica de corriente alterna de un nivel de voltaje en otro nivel de voltaje a la misma frecuencia.
- ▶ Principio de conservación de la energía

$$S \cdot t = cte \Rightarrow Potencia = cte$$

$$S = V_1 \cdot I_1 = V_2 \cdot I_2 (VA)$$

- ▶ Importancia de los transformadores: elevan el voltaje de transmisión, disminuyen las pérdidas en transmisión.

Introducción a los transformadores.

- ▶ El transformador (trafo) es una máquina eléctrica estática, destinada a funcionar con C.A. constituida por dos arrollamientos (primario y secundario) que permite transformar la energía eléctrica, con unas magnitudes V-I determinadas, a otras con valores en general diferentes.
- ▶ Los trafos hacen posible la realización práctica y económica del transporte de la energía a grandes distancias

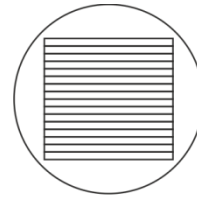
Principales aspectos constructivos

- ▶ Partes principales:
 - ▶ Núcleo
 - ▶ Devanado
 - ▶ Sistema de refrigeración
 - ▶ Aisladores pasantes de salida

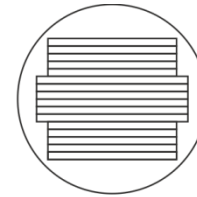


Núcleo: circuito magnético del transformador

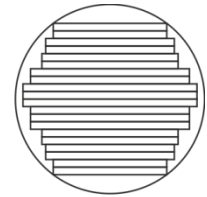
- ▶ Está constituido por chapas de acero al silicio, laminadas en frío (grano orientado) recubiertas de una capa aislante muy delgada (0,01 mm), lo que reduce las pérdidas en el hierro.



1 KVA

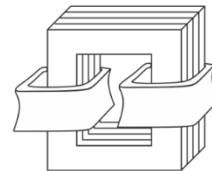


10 KVA

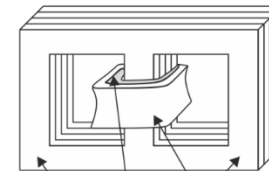


100 KVA

De columnas



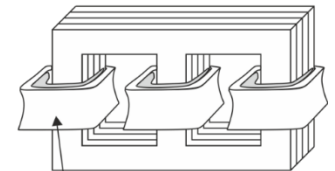
Acorazado



BT AT

Columnas

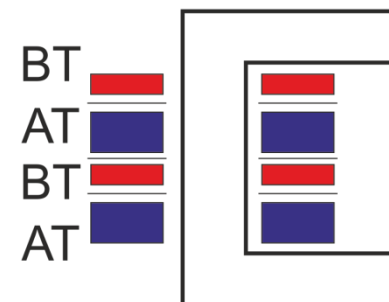
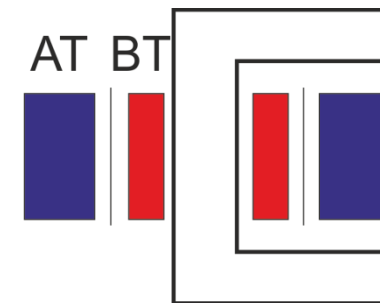
Trifásico



Primario y secundario de fase 1

Devanados: circuito eléctrico del transformador

- ▶ Se realizan por medio de conductores de cobre, en forma de hilos redondos (para diámetros inferiores a 4 mm) o de sección rectangular (pletinas de cobre) cuando se requieren secciones mayores.
- ▶ Los conductores están recubiertos por una capa aislante, que es barniz en los transformadores pequeños y en el caso de pletinas está formada por una o varias capas de fibras de algodón o cinta de papel. Hay de dos tipos
 - ▶ Concéntricos
 - ▶ Alternados



Sistema de refrigeración

- ▶ Para potencias pequeñas, la superficie externa es suficiente para lograr la evacuación de calor necesaria, lo que da lugar a los transformadores en seco.
- ▶ Para potencias elevadas se emplea como medio refrigerante el aceite (transformadores en baño de aceite)
 - ▶ El aceite tiene una doble misión de refrigerante y aislante,.
 - ▶ Actualmente se usan siliconas (aceites sintéticos).
- ▶ Transformadores secos encapsulados en resina epoxi.
 - ▶ No propagan el fuego (autoextinguibles)
 - ▶ No requieren mantenimiento

Funcionamiento (I)

- ▶ Condiciones ideales:
 - ▶ Los devanados 1° y 2° tienen resistencias despreciables (no hay pérdidas por efecto Joule)
 - ▶ No existen flujos de dispersión.
- ▶ Al aplicar el voltaje alterno, v_1 , da lugar a una corriente i_1 y por tanto a un flujo f en el núcleo.
- ▶ Debido a la variación periódica de f se crearán f.e.m.s. inducidas en los arrollamientos

Funcionamiento (II)

- ▶ Estas f.e.m.s tienen las polaridades señaladas en la figura para que estén de acuerdo con la ley de Lenz, de oposición al cambio de flujo.
- ▶ e_1 es una f.c.e.m porque se opone a la tensión aplicada v_1 y limita la corriente en el primario.
- ▶ Al cerrar S se produce i_2 en el sentido de tal modo que al circular por el devanado secundario daría lugar a una acción antagonista sobre el flujo primario.

Bornes

- ▶ En la teoría de circuitos con acoplamientos magnéticos señalan con un punto aquellos terminales de las bobinas que tienen simultáneamente la misma polaridad instantánea.
- ▶ Modo de identificar estos bornes: considera un sentido de flujo positivo en el núcleo y señala con un punto aquellos extremos de los arrollamientos por lo que hay que introducir corriente para obtener flujos de sentido positivo.

Relaciones entre tensiones, flujos y las f.e.m.s (I)

- ▶ Como los devanados son ideales

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

$$e_2 = v_2 = N_2 \frac{d\phi}{dt}$$

- ▶ Si se parte de un flujo senoidal

$$\phi = \phi_m \text{sen} \omega t = \phi_m \cos(\omega t - 90^\circ)$$

$$v_1 = e_1 = N_1 \omega \phi_m \cos \omega t$$

$$e_2 = v_2 = N_2 \omega \phi_m \cos \omega t$$

Relaciones entre tensiones, flujos y las f.e.m.s (II)

- ▶ Como se puede ver, las tensiones y f.e.m.s van adelantadas 90 grados respecto al flujo, siendo sus valores eficaces.

$$V_1 = E_1 = \frac{N_1 \omega \phi_m}{\sqrt{2}} = 4.44 f N_1 \phi_m$$

$$V_2 = E_2 = \frac{N_2 \omega \phi_m}{\sqrt{2}} = 4.44 f N_2 \phi_m$$

- ▶ Por lo que

$$\frac{V_1}{V_2} = \frac{E_1}{E_2} = \frac{N_1}{N_2} = m$$

- ▶ Es la relación de transformación.
- ▶ En un transformador ideal la relación de tensiones coincide con la relación de espiras.

Transformación de impedancias

- ▶ En ambas bobinas tenemos:

$$Z_1 = \frac{V_1}{I_1}; Z_2 = \frac{V_2}{I_2}$$

- ▶ Z_2 es la impedancia en el secundario
- ▶ Z_1 es la impedancia aparente del primario
- ▶ Teniendo en cuenta las relaciones de tensión y corriente en ambas bobinas

$$Z_2' = m^2 Z_2$$

- ▶ Puede verse al transformador como un acoplador de impedancias.

Funcionamiento con carga (I)

- ▶ Si se cierra el circuito con una carga, entonces circula I_2 por el secundario cuyo valor fasorial es

$$\underline{I}_2 = \frac{\underline{E}_2}{\underline{Z}_2} = \frac{\underline{E}_2 \angle 0^\circ}{\underline{Z}_L \angle \varphi_2} = \frac{\underline{E}_2}{\underline{Z}_L} \angle -\varphi_2$$

- ▶ I_2 se retrasa φ_2 de la f.e.m. E_2
- ▶ La corriente i_2 al circular por el devanado secundario produce una f.m.m. $N_2 i_2$ que se opone a la f.m.m. primaria $N_1 i_0$.

Funcionamiento con carga (II)

- ▶ Esto haría que el flujo se anule y no se cumpliría $v_1 = e_1$. Por lo tanto para restablecer el equilibrio hay que neutralizar la f.m.m. $N_2 i_2$ del secundario, con una corriente adicional primaria i'_2 tal que

$$N_1 i'_2 = N_2 i_2$$

$$\Rightarrow i'_2 = \frac{N_2}{N_1} i_2 = \frac{i_2}{m}$$

- ▶ Por tanto, la corriente total necesaria en el primario es

$$i_1 = i_0 + i'_2 = i_0 + \frac{i_2}{m}$$

Funcionamiento en el primario

- ▶ Las ecuaciones anteriores nos indican que la corriente primaria tiene dos componentes:
- ▶ Una corriente de excitación o de vacío, I_0 , cuya misión es producir el flujo en el núcleo magnético y vencer las pérdidas en el hierro a través de sus componentes I_μ e I_{Fe} , respectivamente.
- ▶ Una corriente de carga, I'_2 , que contrarresta la acción desmagnetizante de la f.m.m. secundaria para que el flujo en el núcleo permanezca constante e independiente de la carga.

Circuitos con transformadores ideales

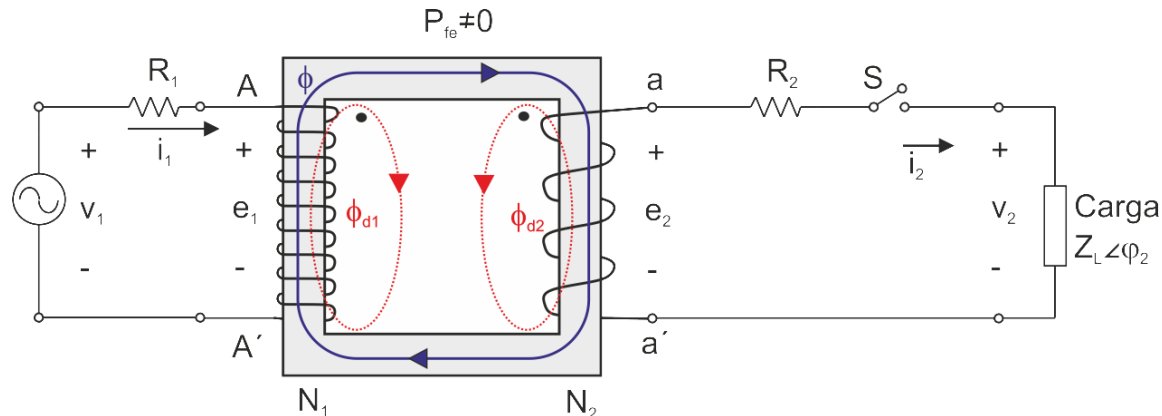
- ▶ En estos circuitos se reemplaza la porción del circuito a un lado del transformador por otra equivalente (referencia o reducción)
 - ▶ Utilizando las ecuaciones para los voltajes y las impedancias en función de la relación de espiras.
 - ▶ Utilizando, para las polaridades del voltaje, la convención de puntos.
- ▶ Se realizan los cálculos. Para la porción sin transformar, se obtienen los valores correctos.
- ▶ Para el lado transformado, los valores se obtienen deshaciendo el cambio mediante la relación de espiras.

Transformador real (I)

- ▶ En los transformadores reales hay que tener en cuenta la resistencia y los flujos de dispersión en el arrollamiento.
- ▶ De todo el flujo producido por los devanados f es la parte común a ambos.

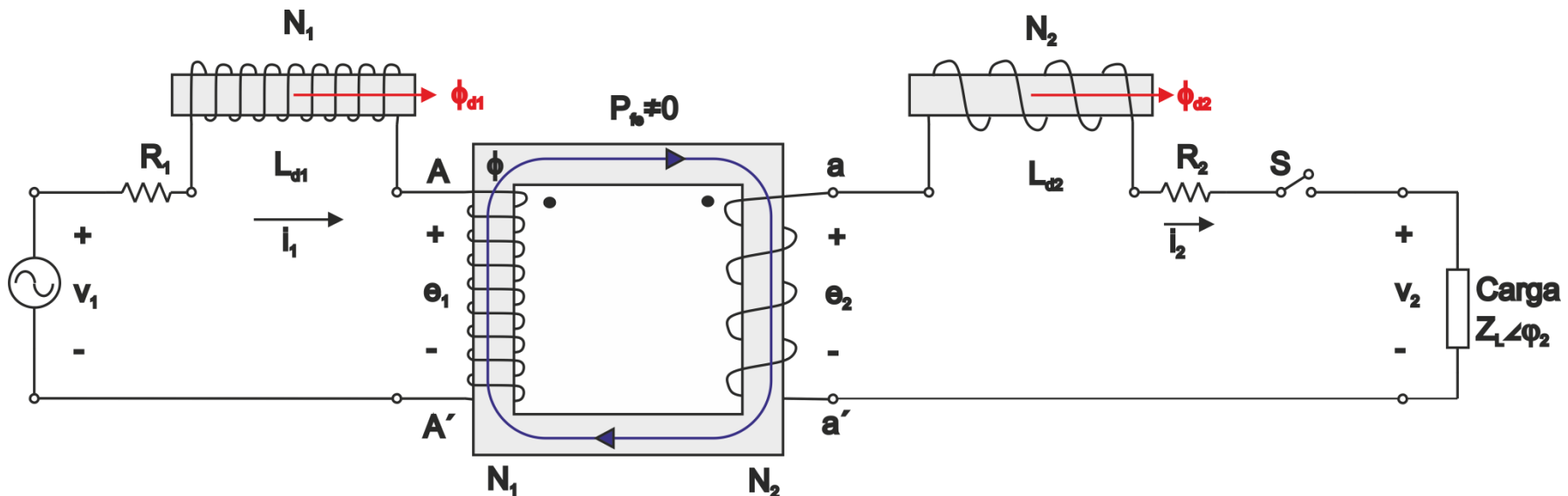
$\phi_2 = \phi + \phi_{d2}$ flujo total que atraviesa el devanado primario.

$\phi_1 = \phi + \phi_{d1}$ flujo total que atraviesa el devanado secundario.



Transformador real (II)

- ▶ En el modelo del circuito se añaden en serie a cada arrollamiento unas bobinas con el mismo número de espiras que los devanados correspondientes, de tal modo que al circular por ellas las intensidades respectivas den lugar a los mismos flujos de dispersión Φ_{d1} y Φ_{d2} que en los bobinados reales.



Transformador real (III)

- ▶ Trafo real con bobinas ideales en el núcleo

$$e_1 = N \frac{d\phi}{dt} \Rightarrow E_1 = 4.44fN_1\phi_m$$
$$e_2 = N \frac{d\phi}{dt} \Rightarrow E_2 = 4.44fN_2\phi_m$$
$$\frac{E_1}{E_2} = \frac{N_1}{N_2} = m$$

- ▶ La aplicación del segundo lema de Kirchhoff a los circuitos primario y secundario, por lo que:

$$\frac{V_1}{V_2} \neq \frac{E_1}{E_2} = \frac{N_1}{N_2}$$

Transformador real (IV)

- ▶ Sin embargo, en los trafos industriales las caídas de tensión a plena carga son del orden del 1 al 10% de las tensiones aplicadas por lo que

$$V_1 \approx E_1 \quad V_2 \approx E_2$$

- ▶ Por lo tanto, aproximadamente:

$$\frac{V_1}{V_2} \approx m$$

Transformador real (V)

- ▶ Si el trafo trabaja en vacío

$$\begin{aligned}V_1 &= E_1 + R_1 I_0 + jX_1 I_0 \\V_2 &= E_2 \quad (I_2 = 0)\end{aligned}$$

- ▶ En vacío $I_0 \approx 6\% - 8\% I_{1n}$ (I_{1n} es la corriente asignada o de plena carga del primario).
- ▶ $R_1 I_0$ y $X_1 I_0$ son muy pequeñas por lo que en vacío se puede considerar como exactas.
- ▶ Siendo V_{20} la magnitud de tensión secundaria en vacío, por lo tanto:

$$\frac{E_1}{E_2} = \frac{V_1}{V_{20}} = \frac{N_1}{N_2} = m$$

Esta relación define la relación de transformación como el cociente entre la tensión primaria aplicada al transformador y la tensión secundaria en vacío. Este cociente es el que incluye el fabricante en la placa de características de la máquina.

Transformador real (VI)

- ▶ En funcionamiento en carga teníamos

$$V_1 \approx E_1 \quad E_1 = 4.44fN_1\phi_m$$

- ▶ por lo que los flujos magnéticos en vacío y en carga son prácticamente iguales y las f.m.m.s en ambos estados de carga coinciden, por lo que sigue siendo válida la ecuación

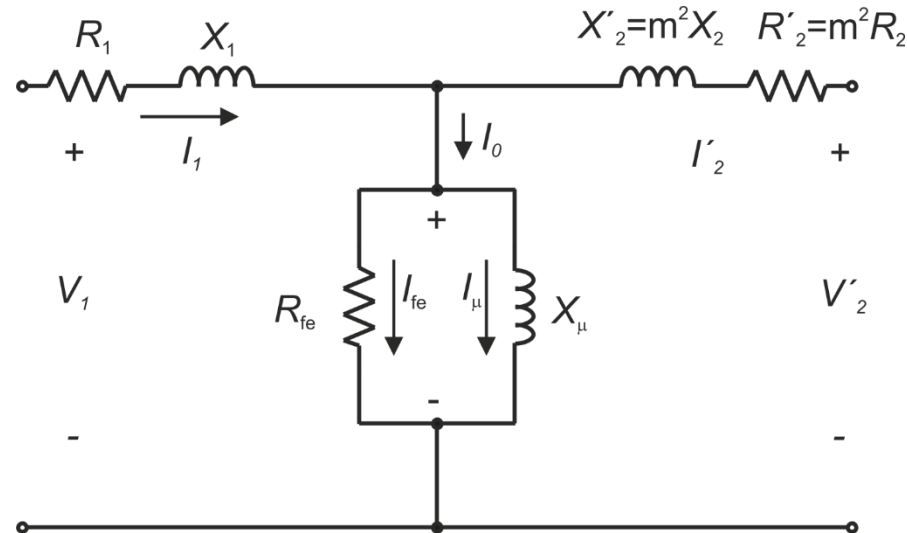
$$I_1 = I_0 + \frac{I_2}{m}$$

Circuito equivalente de un transformador (I)

- ▶ La ventaja de desarrollar circuitos equivalentes es conocer con antelación la respuesta de una máquina en unas determinadas condiciones de funcionamiento.
- ▶ En el caso del trafo el desarrollo de un circuito equivalente se inicia reduciendo ambos devanados al mismo número de espiras.
- ▶ Generalmente se reduce el 2º al 1º, lo que quiere decir que se sustituye el trafo original por otro que tiene el mismo primario con N_1 espiras y un nuevo secundario con un número de espiras N_2 igual a N_1 .

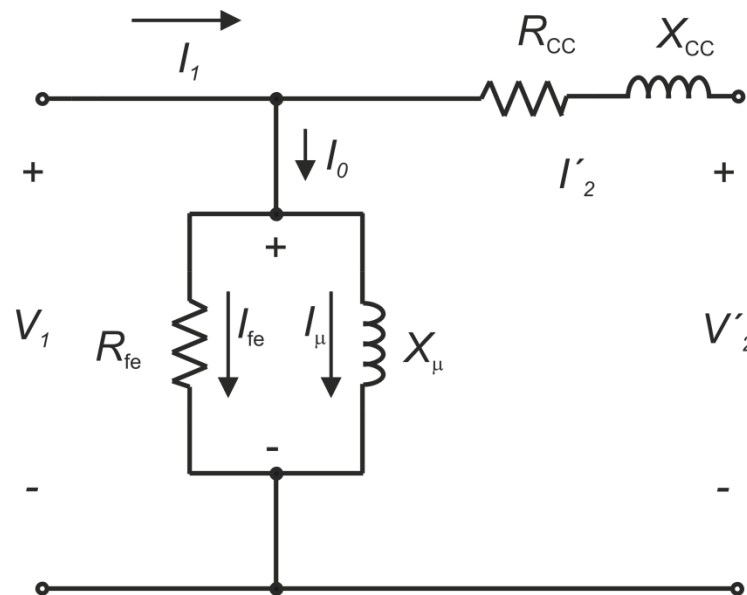
Circuito equivalente de un transformador (II)

- ▶ Para que este nuevo trafo sea equivalente al original, deben conservarse las condiciones energéticas de la máquina:
 - ▶ Las potencias activas y reactivas y su distribución entre los diversos elementos del circuito secundario
 - ▶ Por tanto el circuito equivalente exacto del transformador reducido al primario será



Circuito equivalente de un transformador (III)

- ▶ Como $I_0 < I_1$, I_2 podemos tener el siguiente circuito equivalente aproximado
- ▶ Si $R_{cc} = R_1 + R'_2$ resistencia de cortocircuito
- ▶ $X_{cc} = X_1 + X'_2$ reactancia de cortocircuito

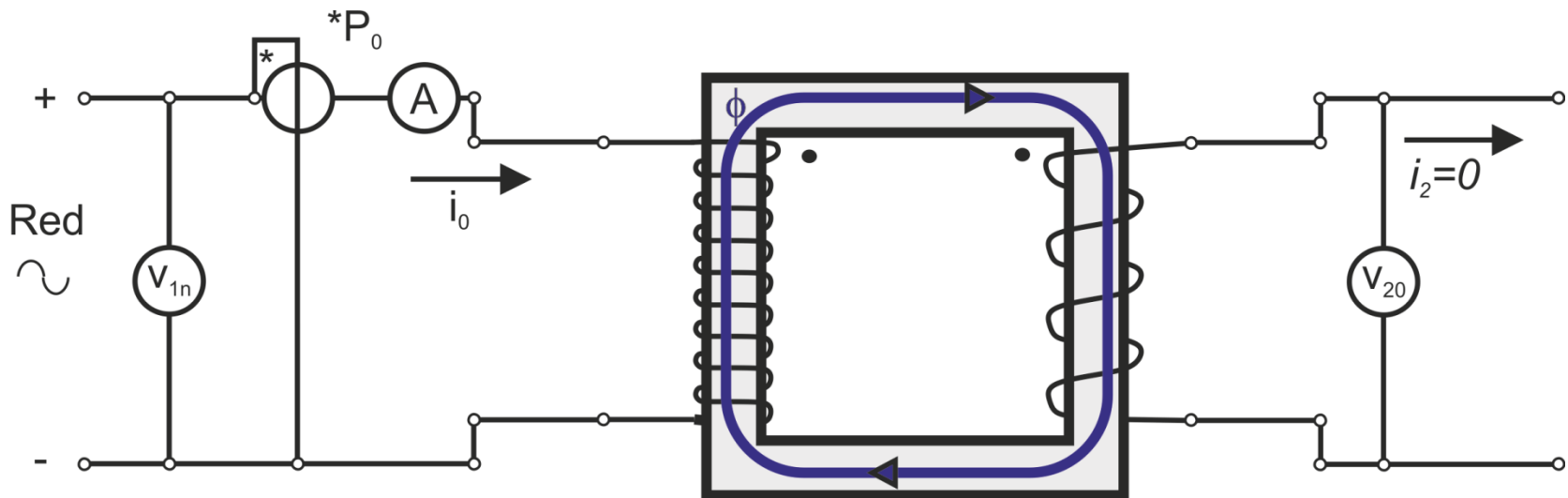


Ensayos del transformador

- ▶ Con los ensayos se puede obtener los elementos que intervienen en el circuito equivalente:
 - ▶ Ensayo de vacío: Cálculo de las pérdidas en el hierro.
 - ▶ Ensayo de cortocircuito: Cálculo de las pérdidas en el cobre.

Ensayo de vacío (I)

- ▶ Se aplica al primario la tensión asignada y se mantiene el secundario en circuito abierto.
- ▶ Se mide la potencia absorbida P_0 , la corriente de vacío, I_0 y la tensión secundaria V_{20} .



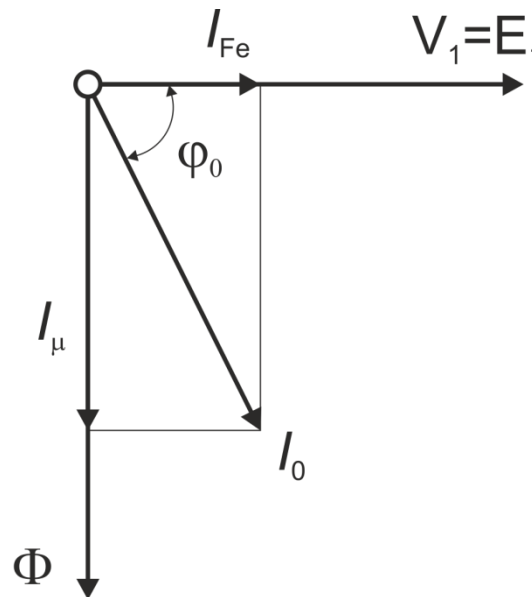
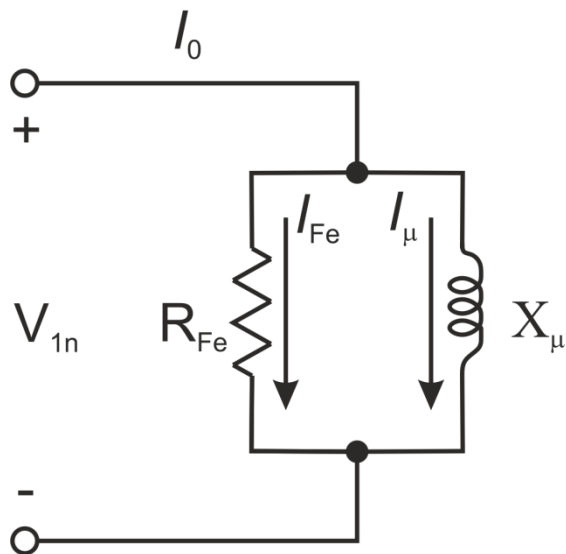
Ensayo de vacío (II)

- ▶ En vacío el primario se comportará como una bobina con núcleo de hierro.
- ▶ El trafo absorberá una corriente de vacío i_0 , que forma un ángulo φ_0 con la tensión aplicada V_1 , de tal forma que la potencia absorbida en vacío, P_0 , es igual a las pérdidas en el hierro, P_{Fe} , en el núcleo del trafo.

$$P_0 = P_{Fe} = V_1 I_0 \cos \varphi_0$$

Ensayo de vacío (III)

- ▶ Como las pérdidas $R_1 I_0^2$ en vacío son despreciables (I_0 muy pequeño) la potencia absorbida en vacío coincide prácticamente con las pérdidas en el hierro.
- ▶ Circuito equivalente en vacío, al ser $I_2=0$



En la práctica real este ensayo se realiza alimentando el devanado de BT

Ensayo de vacío (III)

- ▶ De las medidas podemos obtener el factor de potencia en vacío de

$$P_o = V_{1n} I_o \cos \varphi_o = P_{Fe}$$

- ▶ Debido al pequeño valor de la caída de tensión primaria, se puede considerar $V_{1n} = E_1$ por lo que el diagrama fasorial de la figura anterior

$$I_{Fe} = I_o \cos \varphi_o$$

$$I_{\mu} = I_o \sin \varphi_o$$

Ensayo de vacío (IV)

- ▶ De donde pueden obtener ya los valores

$$R_{Fe} = \frac{V_1}{I_{Fe}} \quad X_{\mu} = \frac{V_1}{I_{\mu}}$$

- ▶ Se puede obtener también la relación de transformación pues

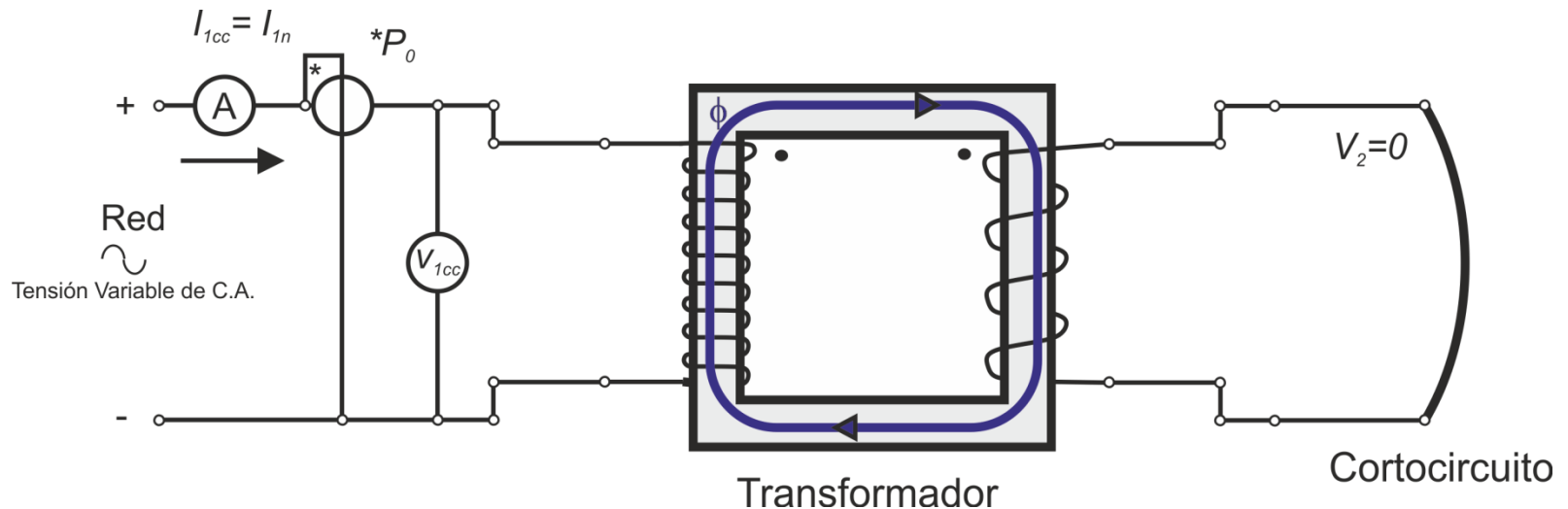
$$V_{1n} \approx E_1$$

$$E_2 = V_{20} \text{ (tensión del secundario medida en el secundario en vacío)}$$

$$m = \frac{N_1}{N_2} = \frac{E_1}{E_2} = \frac{V_{1n}}{V_{20}}$$

Ensayo de cortocircuito (I)

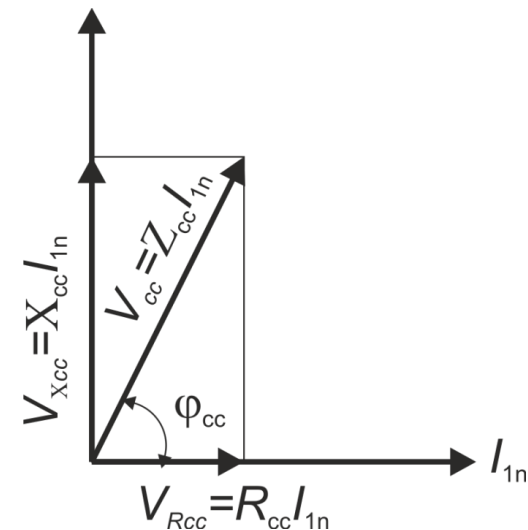
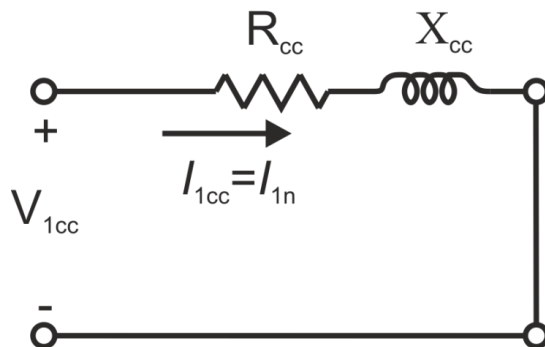
- ▶ Se cortocircuita el 2º y se aplica al primario una tensión que se va elevando gradualmente desde cero hasta que circula la corriente asignada de plena carga.



- ▶ Se realiza en la práctica por el lado de AT, de esta forma la corriente a medir en el primario será de un valor razonable. Al mismo tiempo, la tensión de alimentación sólo será una pequeña parte de la nominal, estando dentro de las escalas de medidas.

Ensayo de cortocircuito (II)

- ▶ La tensión aplicada es pequeña por lo que el flujo en el núcleo es pequeño siendo despreciables las pérdidas en el hierro. Por tanto, la potencia absorbida en cortocircuito coincide con las pérdidas en el cobre.
- ▶ Por lo que el circuito equivalente es ($I_0 \ll I_{1n}$)



Ensayo de cortocircuito (III)

- ▶ De las medidas efectuadas obtenemos el F.P de cortocircuito de la potencia $P_{cc} = V_{1cc} I_{1n} \cos \varphi_{cc}$

- ▶ El diagrama fasorial se ve en la figura anterior.

$$\begin{aligned} V_{R_{cc}} &= R_{cc} I_{1n} = V_{1cc} \cos \varphi_{cc} \\ V_{X_{cc}} &= X_{cc} I_{1n} = V_{1cc} \sin \varphi_{cc} \end{aligned} \quad \Rightarrow \quad \begin{aligned} R_{cc} &= \frac{V_{1cc}}{I_{1n}} \cos \varphi_{cc} \\ X_{cc} &= \frac{V_{1cc}}{I_{1n}} \sin \varphi_{cc} \end{aligned}$$

Ensayo de cortocircuito (IV)

- ▶ En el ensayo de cortocircuito se determina la impedancia total del trafo, pero no da información de cómo están distribuidos estos valores totales entre el 1º y el 2º

$$R_{cc} = R_1 + R'_2$$

$$X_{cc} = X_1 + X'_2$$

- ▶ Para determinar R_1 y R_2 hay que aplicar corriente continua y aplicar la Ley de Ohm. No existe un procedimiento sencillo para obtener X_1 y X'_2 . En la práctica se recurre a la aproximación

$$R_1 = R'_2 = \frac{R_{cc}}{2}$$

$$X_1 = X'_2 = \frac{X_{cc}}{2}$$

Caídas de tensión relativa

- ▶ Normalmente las caídas de tensión indicadas se suelen expresar en % respecto a la tensión asignada.

$$\varepsilon_{cc} = \frac{V_{1cc}}{V_{1n}} 100 \quad \varepsilon_{Rc} = \frac{V_{Rcc}}{V_{1n}} 100 \quad \varepsilon_{Xc} = \frac{V_{Xcc}}{V_{1n}} 100$$

Intensidad de falta

- ▶ Fallo de cortocircuito: trafo alimentado por su tensión asignada primaria cuando por accidente se une entre si los bornes del devanado secundario.
- ▶ Ahora está alimentado a ... V_{1n} ... en lugar de V_{1CC} apareciendo una fuerte corriente I_{1falta} (o I_{2falta})

$$I_{1falta} = \frac{V_{1n}}{Z_{CC}} \quad I_{1n} = \frac{V_{1CC}}{Z_{CC}} \Rightarrow I_{1falta} = \frac{V_{1n}}{V_{1CC}} I_{1n} \quad I_{1falta} = \frac{100}{\varepsilon_{CC}} I_{1n}$$

$$\varepsilon_{CC} = \frac{V_{1CC}}{V_{1n}} 100 \Rightarrow I_{1falta} = \frac{100}{\varepsilon_{CC}} I_{1n}$$

- ▶ Cuanto mayor sea ε_{CC} menor será la corriente de cortocircuito, pero cuanto mayor sea ε_{CC} habrá una fuerte caída de tensión en el trafo. Por tanto hay que llegar a un compromiso.

Caída de tensión en un trafo (I)

- ▶ Si se considera un transformador alimentado a la tensión asignada V_{1n} , en vacío el secundario proporciona una tensión V_{20} , cuando se conecta una carga a la máquina, la tensión medida es V_2 , debido a la caída debido a la impedancia interna, donde $\Delta V_2 = V_2 - V_{20}$ es la caída de tensión interna del transformador
- ▶ Se denomina caída de tensión relativa o regulación

EU

$$\varepsilon_c = \frac{V_{20} - V_2}{V_{20}} 100\%$$

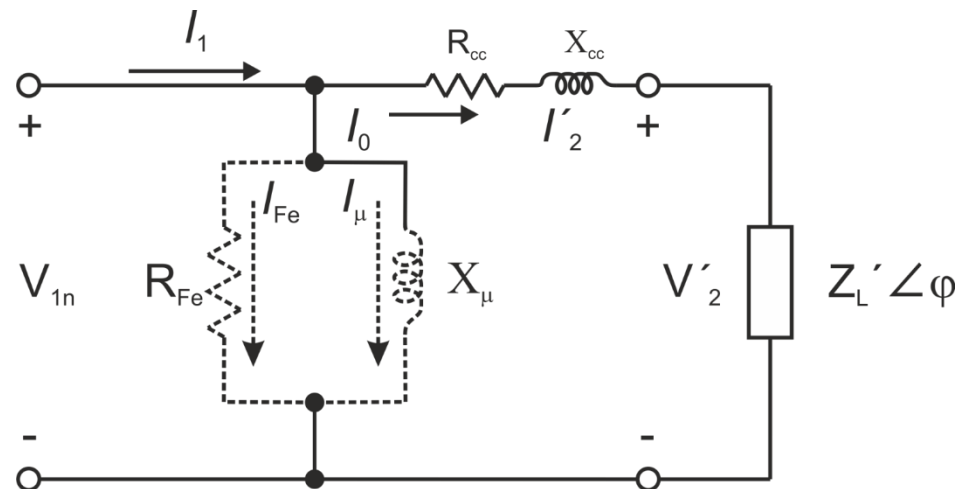
USA

$$\varepsilon_c = \frac{V_{20} - V_2}{V_2} 100\%$$

Caída de tensión en un trafo (II)

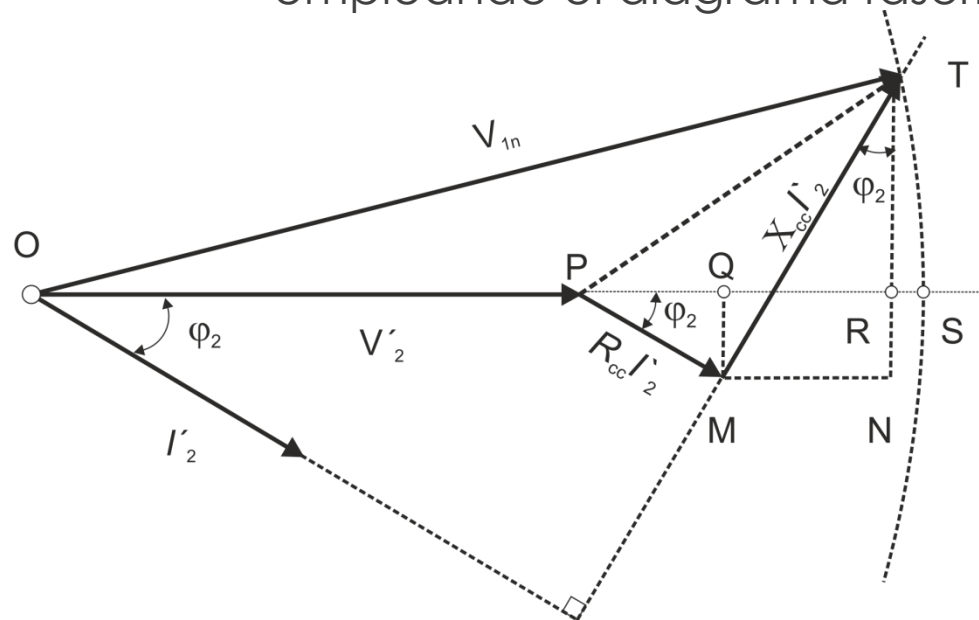
- ▶ Al trabajar con el circuito equivalente reducido al primario es mejor usar la expresión, multiplicando por m y con $V'_2 = mV_2$

$$m = \frac{V_{1n}}{V_{2o}} \quad \rightarrow \quad \varepsilon_c = \frac{V_{1n} - V'_2}{V_{1n}} 100\%$$



Caída de tensión en un trafo (III)

- ▶ Para el cálculo de V'_2 se recurre a un método aproximado empleando el diagrama fasorial de un trafo en carga.



$$V_{1n} - V'_2 = |OS| - |OP| = |PS|$$

$$V_{1n} - V'_2 = |PS| \approx |PR|$$

El triángulo de caída de tensión PTM se denomina triángulo de Kapp

Si se define el índice de carga "c" como $c = \frac{I_2}{I_{2n}} = \frac{I'_2}{I'_{2n}} \approx \frac{I_1}{I_{1n}}$

$$V_{1n} - V'_2 = cR_{cc}I'_{2n} \cos \varphi_2 + cX_{cc}I'_{2n} \operatorname{sen} \varphi_2$$

Pérdidas y rendimiento de un trafo (I)

- ▶ Pérdidas fijas, son pérdidas en el hierro:
 - ▶ Pérdidas por histéresis
 - ▶ Pérdidas por corrientes parásitas o de Foucault
- ▶ Pérdidas variables, varían según sea el régimen de carga, son debidas a pérdidas en el cobre.
- ▶ Estas pérdidas se obtienen de los ensayos del trafo

$$P_{Fe} = P_o$$

- ▶ $[P_{Cu}]_n = P_{cc} = R_{cc} I_{2n}^2$ Pérdidas en el Cu a plena carga

Pérdidas y rendimiento de un trafo (II)

- ▶ En general para una corriente I_2'

$$P_{Cu} = R_{cc} I_2'^2 = R_{cc} c^2 I_{2n}^2 = c^2 P_{cc}$$

- ▶ Rendimiento

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{P_2}{P_2 + P_p}$$

$$P_2 = V_2 I_2 \cos \varphi_2 = c V_2 I_{2n} \cos \varphi_2$$

$$P_p = P_{Fe} + P_{Cu} = P_o + c^2 P_{cc}$$

$$\eta = \frac{c V_2 I_{2n} \cos \varphi_2}{c V_2 I_{2n} \cos \varphi_2 + P_o + c^2 P_{cc}}$$

- ▶ donde $S = V_2 I_{2n}$ es la potencia asignada del trafo en KVA
 - ▶ Un valor típico es $\eta \approx 95\%$

Pérdidas y rendimiento de un trafo (III)

- ▶ El rendimiento es máximo para una determinada carga cuando $P_{Fe} = P_{Cu}$ por lo que $P_o = c^2 P_{cc}$
- ▶ El índice de carga óptimo al cual se obtiene el rendimiento máximo es

$$C_{opt} = \sqrt{\frac{P_o}{P_{cc}}}$$

Regulación de voltaje de un transformador

- ▶ Debido a las impedancias del transformador real, la tensión del secundario varía con el régimen de carga, aun si $V_1 = \text{cte}$.
- ▶ Esto se mide con la regulación de voltaje

$$RV(I) = \varepsilon_c = \frac{V_1 - V_2'}{V_1} \cdot 100\%$$

- ▶ Un transformador ideal $\rightarrow \varepsilon_c = 0$
- ▶ En general, interesa ε_c baja, excepto en el caso de que se quieran tener en cuenta las posibles fallas en la carga del secundario

Autotransformadores

- ▶ El autotransformador es un trafo especial formado por un devanado continuo, que se utiliza a la vez como primario y secundario. Por lo que las tensiones de alimentación y salida no van aisladas entre sí.
- ▶ Un autotransformador transfiere energía entre los dos circuitos en parte por acoplamiento magnético y en parte por conexión eléctrica directa.
- ▶ Hay un ahorro en material para el autotransformador frente al transformador, se necesita menos Cu y Fe. Por tanto el autotransformador tiene menos pérdidas en el Cu y Fe, mejorando el rendimiento y la caída de tensión.
- ▶ Inconvenientes:
 - ▶ Debido a su menor resistencia y reactancia (al existir menos espiras) resulta un bajo valor de caída ε_{CC} lo que supone en caso de una falta o fallo de cortocircuito corrientes más elevadas.
 - ▶ Un borne común a los arrollamientos de AT y BT

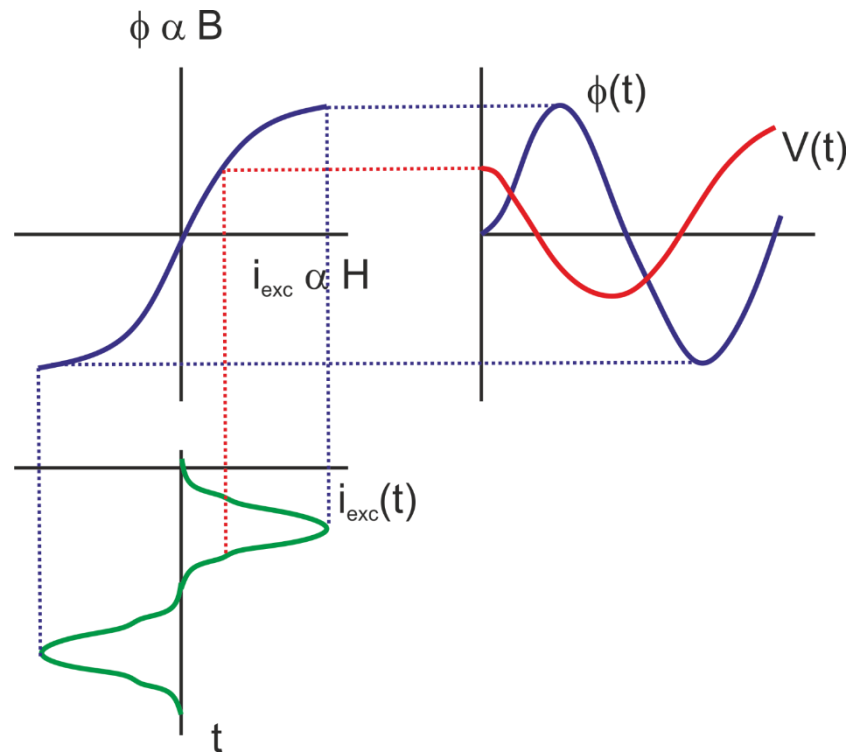
Transformadores de medida

- ▶ No es posible hacer una conexión directa de los aparatos de medida a los circuitos de AT.
- ▶ Para la conexión de los amperímetros se emplean los transformadores de corriente y para la conexión de los voltímetros se emplean los transformadores de tensión.
- ▶ Trafo de tensión
 - ▶ Su forma de funcionamiento y conexión es análoga a la de los transformadores de potencia

Armónicos de la corriente de vacío (I)

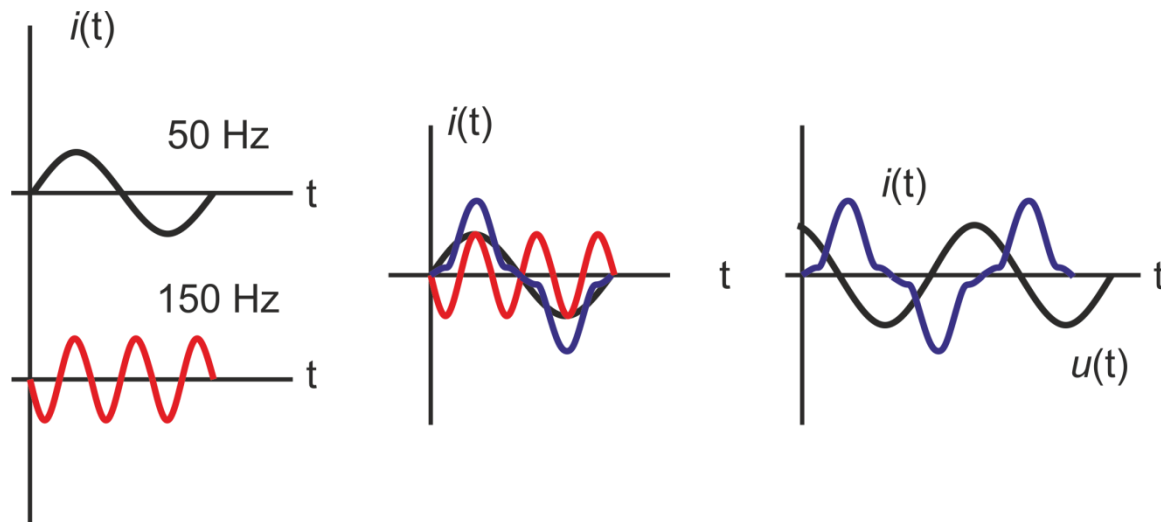
- ▶ Cuando un trafo trabaja en vacío ($i_2=0$) la corriente que absorbe del primario i_0 se denomina corriente de vacío y es análoga a la corriente de excitación de una bobina con núcleo de hierro.
- ▶ La curva de imantación de un material ferromagnético es no lineal y de hecho el punto de trabajo normal en las máquinas eléctricas está en el codo de la curva de magnetización del material, lo que ejerce gran influencia en la forma de la curva de corriente de excitación, que no será senoidal.

Armónicos de la corriente de vacío (II)



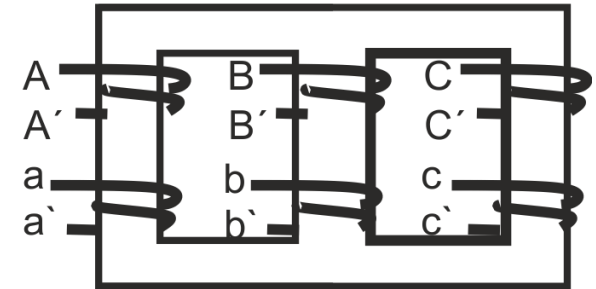
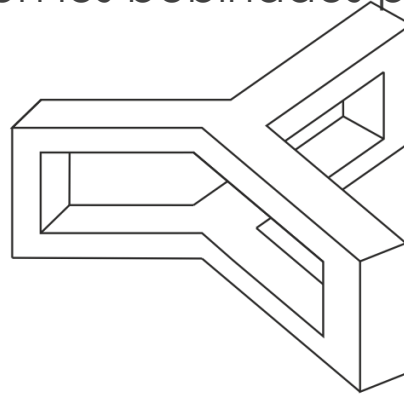
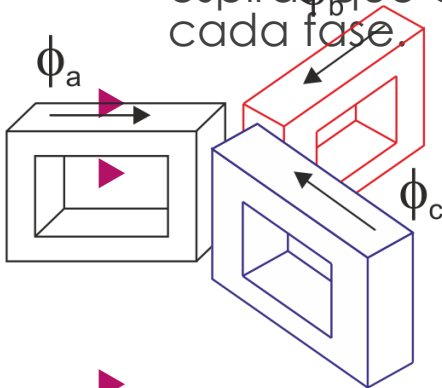
Armónicos de la corriente de vacío (III)

- ▶ La forma de la onda de corriente no es senoidal y por desarrollo en serie de Fourier se puede demostrar que está formada por los armónicos impares.
- ▶ Se puede considerar que la corriente está compuesta por una componente fundamental de 50 Hz y un 3er armónico a 150 Hz.
 - ▶ La circulación en líneas aéreas del 3er armónico de corriente puede interferir por inducción mutua con líneas telefónicas paralelas cercanas, pues 150 Hz está en el rango audible.
 - ▶ Las caídas de tensión de 3er armónicos en la línea modifican la tensión a finales de línea.



Transformadores trifásicos (I)

- ▶ Está formado por tres columnas iguales sobre las que se arrollan las espirales que constituyen los bobinados primario y secundario de cada fase.



$$\phi_{\text{Total}} = \phi_a + \phi_b + \phi_c = 0$$

- ▶ Se puede considerar que este núcleo trifásico es el resultado de la unión de tres sistemas monofásicos.

Transformadores trifásicos (II)

- ▶ En el estudio del trafo trifásico hay que considerar cada columna como un transformador monofásico.

$$m = \frac{N_{a1}}{N_{a2}} = \frac{E_{a1}}{E_{a2}}$$

- ▶ Dependiendo de los tipos de conexión de los devanados de un trafo, pueden aparecer unas determinadas diferencias de fase entre las tensiones compuestas del primario y el secundario.

Transformadores trifásicos (III)

- ▶ Se supone que el trafo se alimenta en sentido directo RST (ABC) y se considera ángulos positivos los de retraso del lado de menor tensión respecto al devanado de tensión más elevada (índice horario)
- ▶ Estos ángulos son múltiplos de 30°
 - ▶ Ej1: Un índice 5, quiere decir un retraso de $5 \times 30 = 150^\circ$ de la tensión menor respecto a la superior

Relación de transformación

- ▶ En un trafo monofásico, el cociente entre las tensiones primaria y secundaria en vacío coincide con cociente del número de espiras N_1/N_2 , sin embargo, en los transformadores trifásicos no ocurre lo mismo.
- ▶ En un trafo trifásico con devanados primarios de N_1 espiras y secundarios de N_2 espiras, dependiendo de cómo se conecten entre sí las bobinas primarias y secundarias se pueden tener distintas relaciones de transformación.

Armónicos en las corrientes de excitación de transformadores trifásicos (I)

- ▶ Bancos trifásicos a base de transformadores monofásicos
 - ▶ Si se aplica una tensión senoidal a un trafo monofásico y el núcleo trabaja en el codo de la curva de imantación, se obtiene una corriente de excitación de forma acampanada con un contenido de armónicos impares.
- ▶ Transformadores con núcleo magnético trifásico
 - ▶ Consideramos el trafo Y-y.
 - ▶ No se dispone de neutro en el primario → no circula 3º armónicos de corriente → el flujo magnético tiene 3º armónicos

Armónicos en las corrientes de excitación de transformadores trifásicos (II)

- ▶ Al ser el núcleo trifásico la suma de los flujos de las tres columnas debe ser 0 ya que no existe una cuarta columna de retorno. Por tanto los flujos fundamentales son cero porque están desfasados en 120° pero no los de 3° armónicos.
- ▶ Por tanto los 3° armónicos reflujos tienden a cerrarse por una cuarta columna de retorno que es el aire, lo que representa un camino de gran reluctancia y por tanto apenas existirán terceros armónicos de flujo \rightarrow las tensiones simples secundarias no presentarán terceros armónicos de gran consideración.

Transformadores con núcleo magnético trifásico (I)

- ▶ Una forma práctica de eliminar el flujo de 3º armónicos es evitando que salten por el aire para ello se conecta el secundario en triángulo.
- ▶ Porque en este caso se produce una corriente de terceros armónicos inducida, que circulará por los tres devanados secundarios creando un flujo en oposición a los flujos armónicos producidos por las corrientes primarias de excitación. Por tanto, se ha producido una anulación de los flujos de tercer armónico

Transformadores con núcleo magnético trifásico

- ▶ Se consigue el mismo efecto dotando al trafo Yy de arrollamiento de compensación. El devanado terciario es un arrollamiento conectado en triángulo sin conexión al exterior, cuyo principio de funcionamiento es análogo al de la conexión del secundario en triángulo.
- ▶ Este montaje se utiliza cuando se desea eliminar los flujos armónicos y se quiere disponer de neutro secundario.

Conexiones de los trafos trifásicos (I)

- ▶ La conexión Y-y es ventajosa cuando han de enlazarse dos sistemas de tensiones relativamente altas, y en los casos en donde no existe desplazamiento de fase entre las tensiones de primario y secundario.
- ▶ Presenta dos inconvenientes graves:
 - ▶ 1) Si la carga del transformador es desequilibrada, se producen flujos alternos en las columnas que van en fase, lo que da lugar a tensiones homopolares que provocan un desequilibrio en las tensiones simples
 - ▶ 2) existen terceros armónicos de tensión. Se puede corregir conectando rígidamente a tierra los neutros, aunque esto permite que circulen armónicos de corriente de vacío.

Conexiones de los trafos trifásicos (II)

- ▶ Además, se puede añadir un tercer devanado conectado en triángulo que anula los flujos homopolares debidos bien sea a los armónicos de tensión como a los desequilibrios de las cargas. De este devanado terciario, se puede tener terminales al exterior para alimentar los circuitos auxiliares del centro de transformación.
- ▶ Este conexión Y-y es usada poco, pues se puede lograr igual prestaciones con otro tipo de transformador trifásico.

Conexiones de los trafos trifásicos (III)

- ▶ Conexión Y-d no tiene problemas con los componentes de tercer armónico de tensión. La conexión se comporta bien bajo cargas desequilibradas, ya que el triángulo redistribuye parcialmente cualquier desequilibrio que se presente.
- ▶ Tiene el inconveniente de que las tensiones secundarias sufren un desplazamiento de 30° con respecto a las tensiones del primario, lo que puede provocar problemas al conectar en paralelo los secundarios de dos grupos de transformadores, pues deben tener el mismo índice horario.
- ▶ La conexión Y-d se adapta bien a transformadores en sistemas de alta tensión en el extremo reductor de tensión de la línea.

Conexiones de los trafos trifásicos (IV)

- ▶ Conexión D-y presenta las mismas ventajas y el mismo desplazamiento de fase que la conexión Y-d. Se utiliza como transformador elevador en las redes de A.T. También es utilizado en transformadores de distribución, correspondiendo la estrella al lado de baja tensión, que permite de este modo alimentar cargas trifásicas y cargas monofásicas. El primario en triángulo tiende a compensar los desequilibrios producidos por las cargas monofásicas.

Conexiones de los trafos trifásicos (V)

- ▶ Conexión D-d se utiliza en transformadores de B.T., ya que necesita más espiras/fase de menor sección. Se comporta bien frente a cargas desequilibradas.
- ▶ Conexión Y-z, la conexión zig-zag se emplea únicamente en el lado de B.T. Se utiliza en redes de distribución, ya que permite de neutro en el secundario. Se comporta bien a desequilibrios de cargas. Debido a la composición de tensiones de lado secundario, se requiere un 15% más de espiras que en una conexión en estrella convencional.