
ELECTROTECNIA

Bloque: Máquinas Eléctricas

TEMA 12. TRANSFORMADORES



Tema 12: Transformadores

- **INDICE**
- **Consideraciones preliminares**
- Tipos y construcción
- **El transformador ideal**
- **Análisis de circuitos que contienen transformadores ideales**
- Teoría de operación de los transformadores monofásicos reales
- El transformador trifásico
- Valores nominales de los transformadores
- Índice de carga del transformador

Consideraciones preliminares

Los transformadores son **máquinas eléctricas estáticas**, destinadas a funcionar en **corriente alterna**. Constan de dos arrollamientos, **primario y secundario**, lo cual les permite transformar energía eléctrica, con unas magnitudes V-I determinadas, a otras con valores en general diferentes.

La **importancia de los transformadores** se debe a que gracias a ellos ha sido posible el **enorme desarrollo en la utilización de la energía eléctrica**, haciendo posible la realización práctica y económica del transporte de la energía a grandes distancias.



Consideraciones preliminares

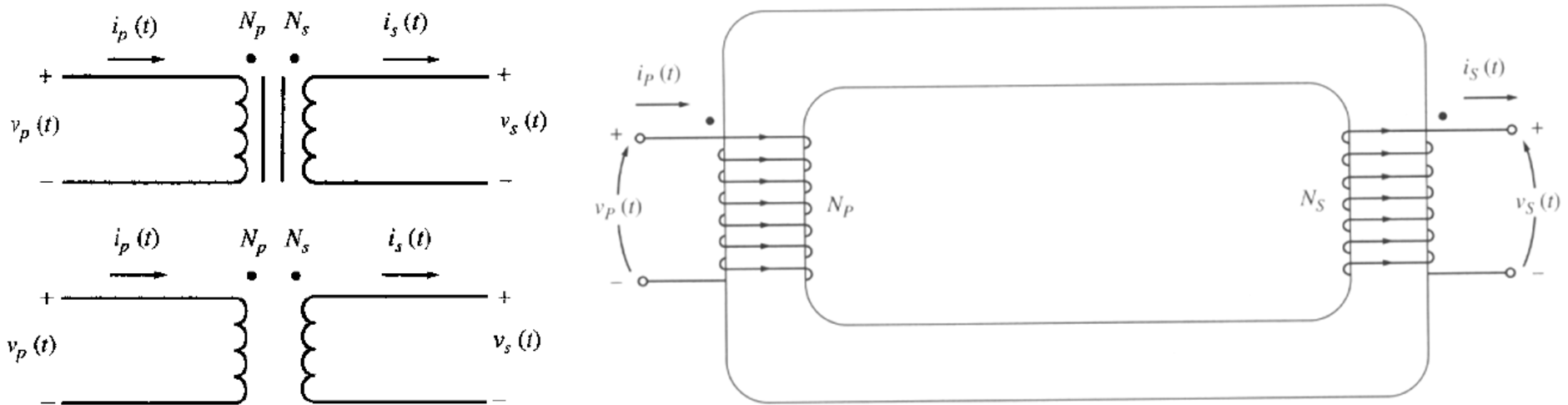
El arrollamiento de mayor tensión, recibe el nombre de **devanado de alta tensión** (A.T.) y el de menor tensión se denomina **devanado de baja tensión** (B.T.)

El proceso de transformación tiene un gran rendimiento al no disponer la máquina de órganos móviles, pudiéndose llegar en los grandes transformadores a valores del 99,7%



Consideraciones preliminares

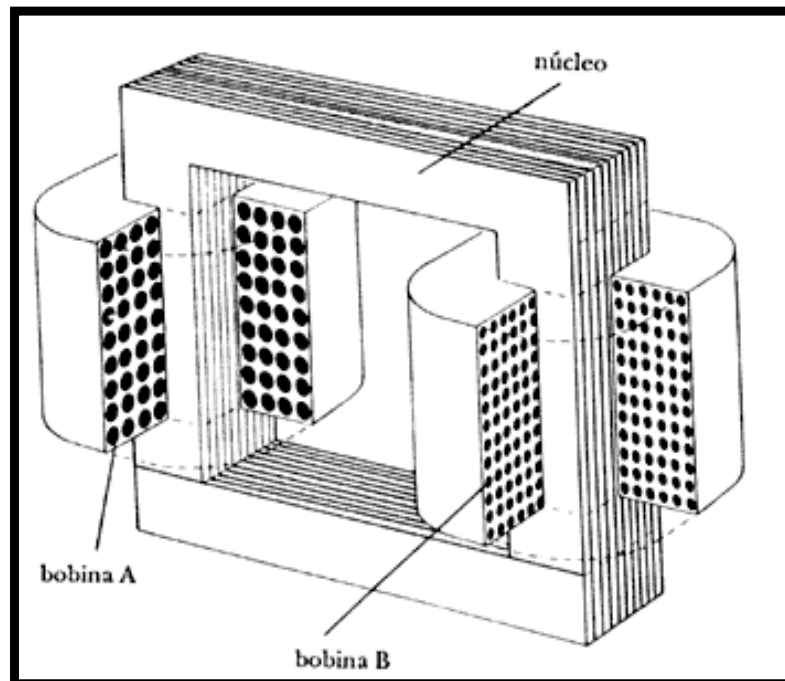
El transformador consta de una o más bobinas de inducción enrolladas sobre un núcleo ferromagnético común. Estas bobinas, no se suelen estar conectadas entre sí eléctricamente. Sin embargo, sí que se hallan conectadas a través del flujo magnético común que se encuentra confinado



Asumiendo que el transformador tenga al menos 2 devanados, uno de ellos (primario) se conectará a una fuente de corriente alterna, mientras que el otro (secundario) se conectará a las cargas.

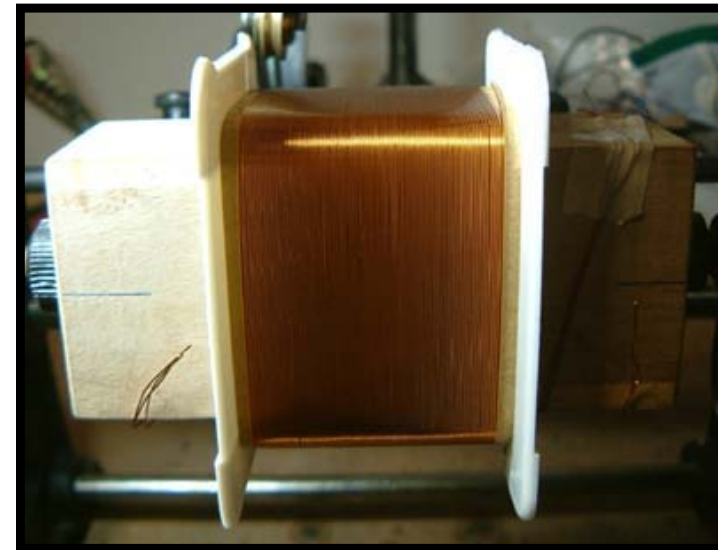
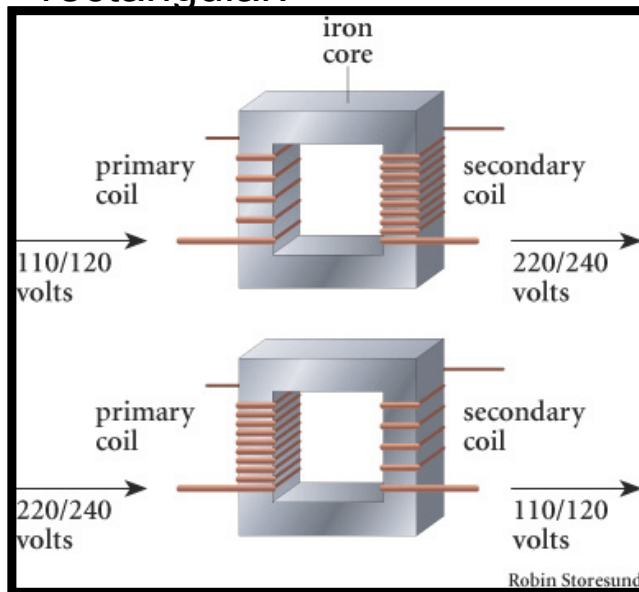
Partes del transformador

- El transformador consta de las siguientes partes:
- A) **Núcleo**: Sistema que forma su circuito magnético. El circuito magnético está compuesto por **columnas**, que son las partes donde se montan los devanados, y las **culatas**, que son las partes que realizan la unión entre las columnas.



Partes del transformador

- B) **Devanados:** Constituyen el circuito eléctrico del transformador y se realizan por medio de conductores de cobre, en forma de hilos redondos o de sección rectangular.



- C) **Sistema de refrigeración:** Para evitar que consigan altas temperaturas es preciso dotar al transformador de un sistema de refrigeración adecuado.

- Potencias pequeñas: la superficie externa de la máquina es suficiente para lograr la evacuación de calor necesaria (**transformadores en seco**).
- Potencias elevadas: Se suele emplear como medio refrigerante el aceite (transformadores en baño de **aceite**). El aceite tiene una doble misión: refrigerante y aislante.

Partes del transformador

- D) **Aisladores pasantes y otros elementos:** Los bornes de los transformadores se llevan al exterior de la cuba mediante unos aisladores pasantes de porcelana, rellenos de aire o aceite.
- E) **Placa de Características:** Cartulina metálica serigrafiada que incluye los datos de potencia asignada, tensiones, frecuencia e impedancias **en tanto por ciento**.



OASA TRANSFORMADORES
SAN SEBASTIAN

TRANSFORMADOR TRIFASICO 50 Hz REFRIGERACION NATURAL

TIPO **630 / 25-20**

NORMA UNE **21428** POTENCIA ASIGNADA **630** kVA

AÑO FABRICACION **2000** Nº FABRICACION **37284**

ALTA TENSION

POS. CONM. 1	POS. CONM. 2	TENSION (V)	CORRIENTE (A)
1	1	26875	14,55
2		26250	
3		25625	
4		25000	
5	24375		
1	2	21875	18,19
2		21250	
3		20625	
4		20000	
5		19375	

BAJA TENSION

LINEA EN:	TENSION (V)	CORRIENTE (A)	POTENCIA kVA
2U-2V-2W	420/n	866	630
3U-3V-3W	242/n	1128	673

LIQUIDO AISLANTE **ACEITE**

SIMBOLO DE ACOPLAMIENTO **Dyn11**
 IMPEDANCIA CC A 75 ° % (%) **4,73**
 NIVEL DE POTENC. ACUSTICA dB(A) **67**
 MATERIAL AT/BT **Cu/Cu**
 VOLUMEN (l) AISLANTE A 20°C **584**
 MASA A DESENCUBAR (kg) **1.940**
 MASA TOTAL (kg) **2.810**
 NIVEL AISLAMIENTO { AT IR 170 FI 70
 BT IR 20 FI 10

Partes del Transformador

- Todas las partes anteriores descritas forman el transformador

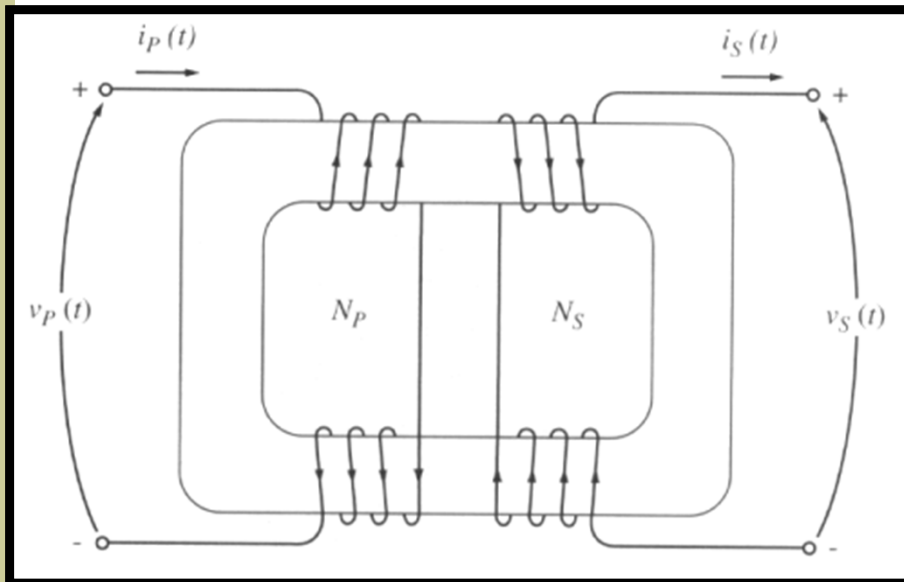


Construcción

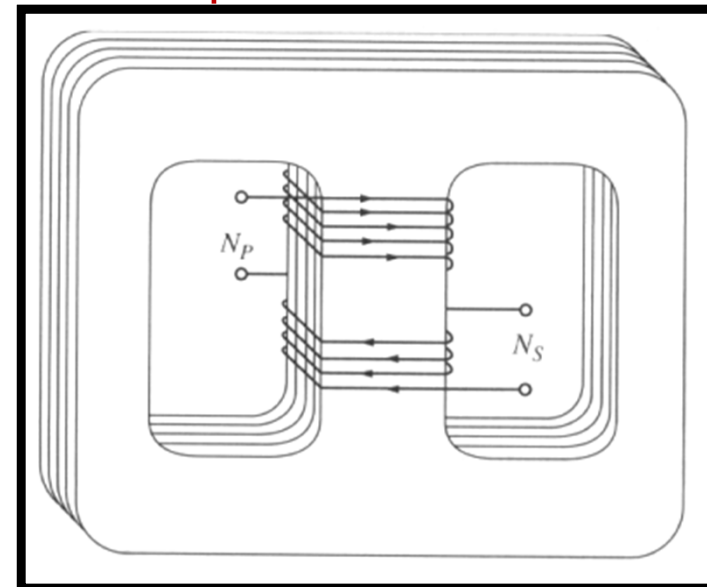
Transformadores de potencia

Tipo núcleo

Tipo acorazado



Los devanados están enrollados sobre 2 de los lados del núcleo laminado en forma de rectángulo.



Los devanados están enrollados alrededor de la columna central del núcleo laminado.

Construcción

Tipo acorazado

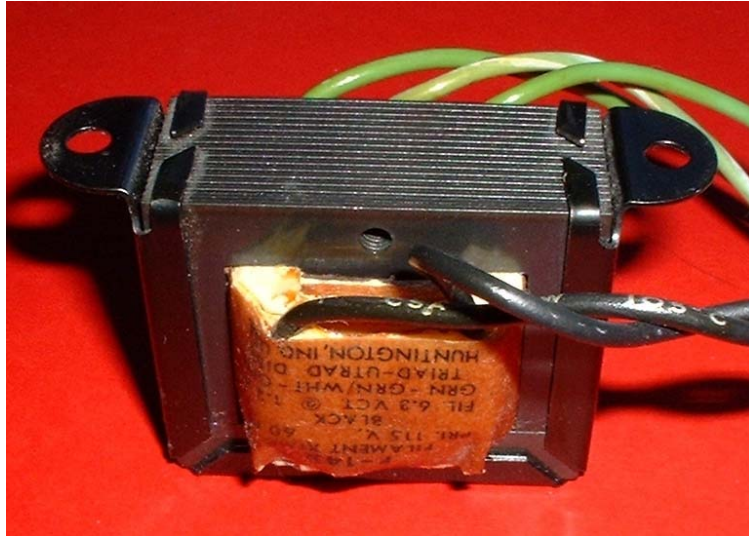


Normalmente, los devanados de primario y de secundario están físicamente enrollados el uno sobre el otro; el devanado de menor tensión está situado en la parte interna (más cerca del núcleo)

Esta disposición cumple 2 objetivos:

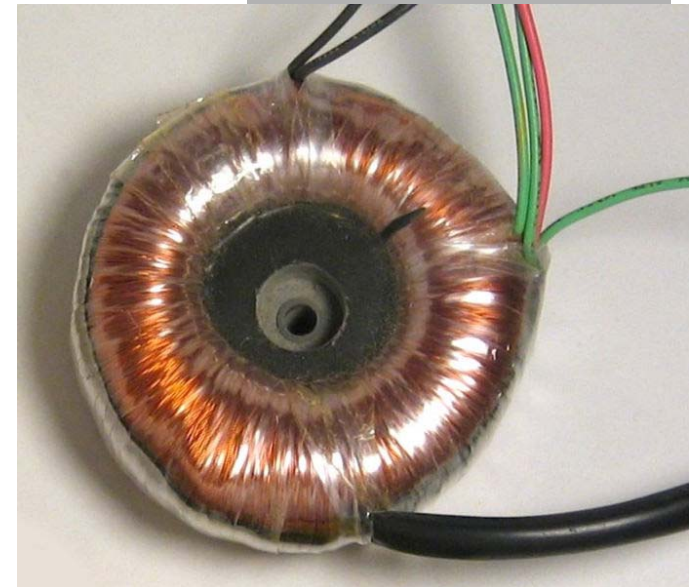
- 1) Simplifica el problema de aislamiento del devanado de mayor tensión.
- 2) Resulta menos flujo disperso que en caso de disponer los dos devanados en el núcleo de forma separada

Construcción



Núcleos de acero laminado

Tipos de laminación

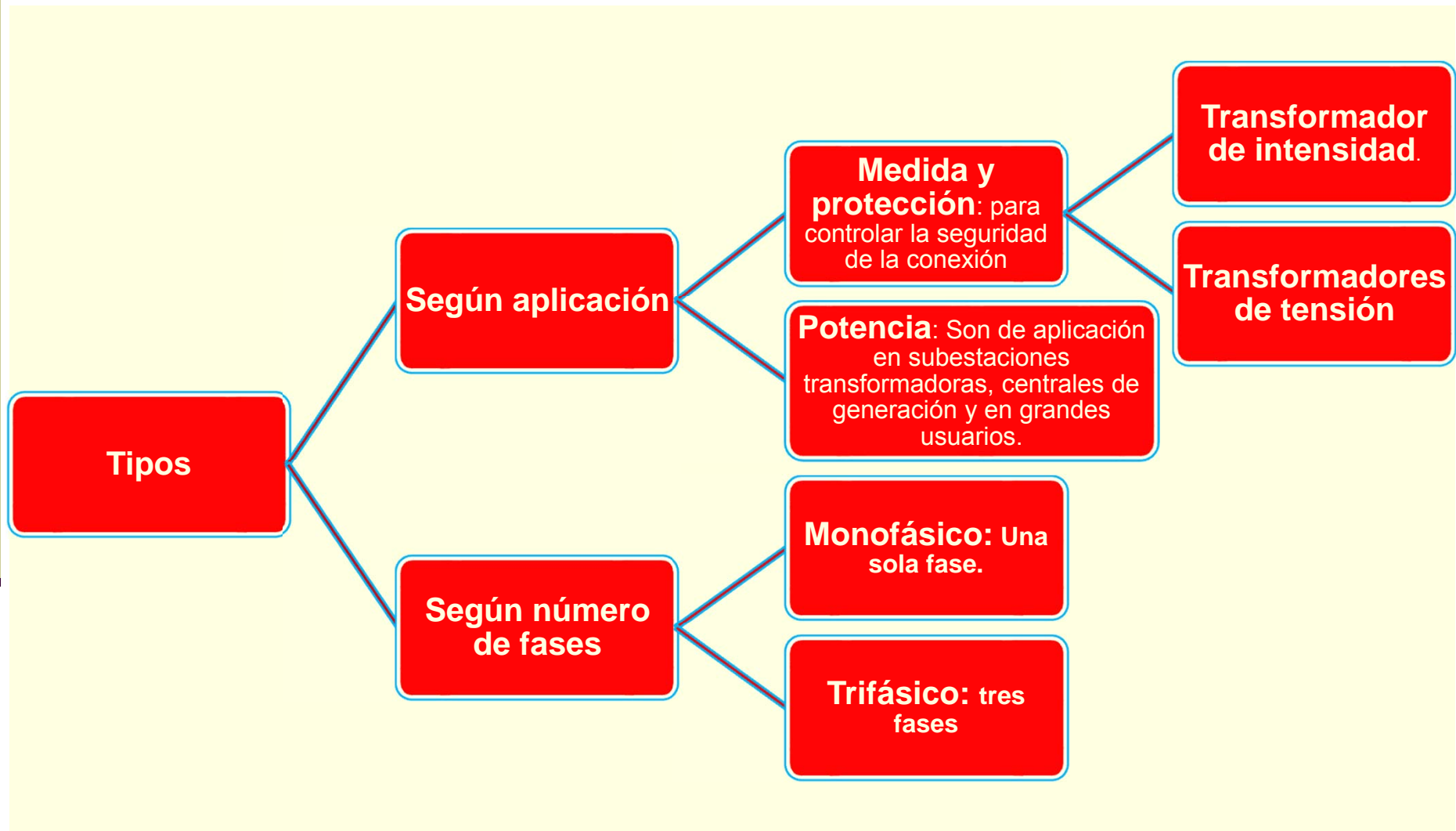


Núcleo de acero toroidales

La eficiencia de los transformadores con núcleo toroidal es normalmente mayor que los que poseen el núcleo laminado.



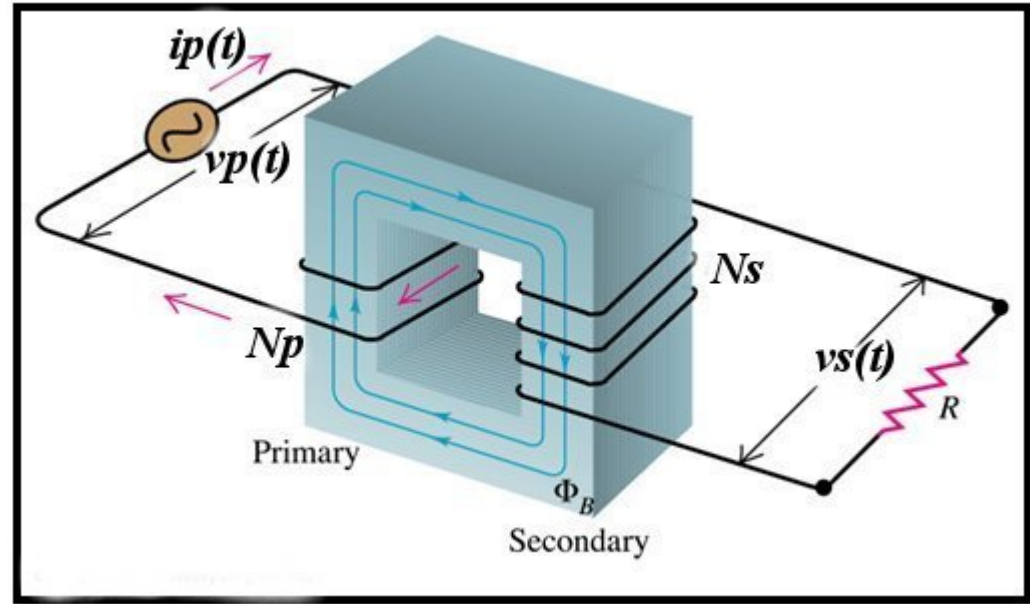
Tipos de transformadores



El transformador ideal

Dispositivo sin pérdidas con un devanado de entrada (primario) que posee N_p espiras y un devanado de salida (secundario) con N_s espiras.

La relación entre la tensión aplicada al devanado de primario $v_p(t)$ y la tensión inducida en el devanado de secundario $v_s(t)$ es:



$$\frac{v_p(t)}{v_s(t)} = \frac{N_p}{N_s} = a$$

Donde a es la **relación de transformación del transformador**.

El transformador ideal

La relación entre la corriente $i_p(t)$ que fluye en el lado primario del transformador y la corriente $i_s(t)$ por el secundario es:

$$N_p \cdot i_p(t) = N_s \cdot i_s(t)$$



$$\frac{i_p(t)}{i_s(t)} = \frac{1}{a}$$

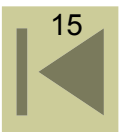
En notación fasorial:

$$\frac{\vec{V}_p}{\vec{V}_s} = a$$

$$\frac{\vec{I}_p}{\vec{I}_s} = \frac{1}{a}$$

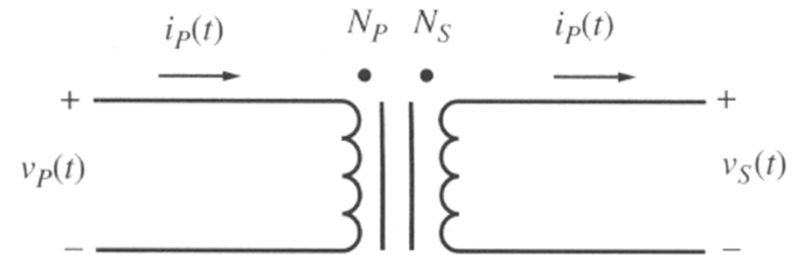
Los ángulos de fase de las tensiones de primario y de secundario son idénticos. Asimismo, los ángulos de fase de las corrientes de primario y de secundario coinciden.

Conclusión: *La relación de vueltas de un transformador ideal afecta a las magnitudes de las tensiones y corrientes, pero no a sus ángulos.*



El transformador ideal

Uno de los terminales de los devanados se suele marcar con un punto a fin de determinar la polaridad de las tensiones y corrientes en el transformador.



Convención de puntos

1. Si la *tensión* en el primario del transformador es positiva en el extremo de la bobina marcado con un punto en un momento dado de tiempo, la tensión en el secundario del transformador será, también, positiva en el extremo marcado con un punto para ese mismo instante de tiempo.
2. Si la *corriente* en el primario del transformador fluye *hacia dentro* del devanado primario por el extremo marcado con un punto, la corriente por el secundario del transformador fluirá *hacia afuera* del devanado secundario por el extremo marcado con punto.

Potencia en un transformador ideal

Asumiendo que θ_p y θ_s son los ángulos de desfase entre las tensiones y corrientes del primario y secundario respectivamente, la potencia suministrada al transformador por el circuito primario será:

$$P_{entrada} = V_p I_p \cos \theta_p$$

La potencia suministrada por el circuito secundario a las cargas es:

$$P_{salida} = V_s I_s \cos \theta_s$$

Puesto que los ángulos entre tensiones y corrientes no se afectan en el caso del transformador ideal:

$$\theta_p = \theta_s = \theta$$

Ambos devanados de un transformador ideal tienen el mismo factor de potencia

Potencia en un transformador ideal

En un transformador ideal:

$$V_s = \frac{V_p}{a}; \quad I_s = aI_p$$

Por tanto:

$$P_{salida} = V_s I_s \cos \theta = \frac{V_p}{a} a I_p \cos \theta = V_p I_p \cos \theta = P_{entrada}$$

La potencia de salida de un transformador ideal es igual a su potencia de entrada (asumiendo que no existan pérdidas). Similarmente, para las potencias reactivas y aparentes se tienen las siguientes expresiones:

$$Q_{salida} = V_s I_s \operatorname{sen} \theta = V_p I_p \operatorname{sen} \theta = Q_{entrada}$$

$$S_{salida} = V_s I_s = V_p I_p = S_{entrada}$$



Análisis de circuitos que contienen transformadores ideales.

Ejemplo 1: Un transformador monofásico de 100 KVA, 3000/220 V, 50 Hz, tiene 100 espiras en el devanado secundario. Supuesto que el transformador es ideal, calcular:

- a) Corrientes primaria y secundaria a plena carga.
- b) Número de espiras del arrollamiento primario.

Análisis de circuitos que contienen transformadores ideales. Transformación de impedancias

La impedancia de un dispositivo o elemento se define como: $\vec{Z}_L = \vec{V}_L / \vec{I}_L$

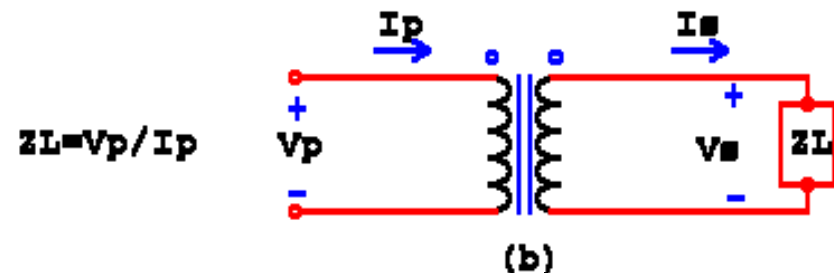
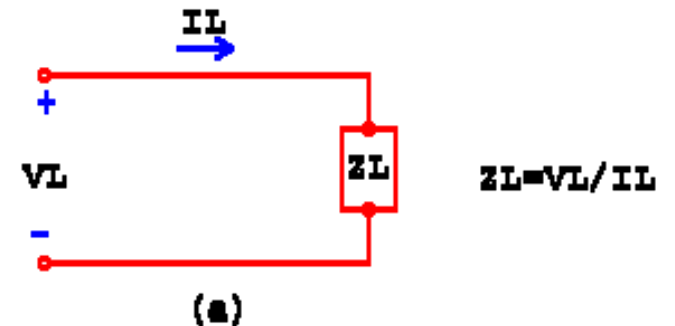
Un transformador cambia los niveles de tensión y corrientes y, por tanto, la impedancia aparente de un elemento. Si se expresa la impedancia de carga en función de las tensiones y corrientes por el secundario:

$$\vec{Z}_L = \vec{V}_s / \vec{I}_s$$

La impedancia aparente del circuito primario sería:

$$\vec{Z}_L' = \vec{V}_p / \vec{I}_p$$

la cual es:



$$\vec{Z}_L' = \frac{\vec{V}_p}{\vec{I}_p} = \frac{a\vec{V}_s}{\vec{I}_s/a} = a^2 \frac{\vec{V}_s}{\vec{I}_s} = a^2 \vec{Z}_L$$

Análisis de circuitos que contienen transformadores ideales

Un **método simple** para analizar un circuito que contiene un transformador ideal es **reemplazando la porción de circuito ubicada a un lado del transformador por su circuito equivalente** con las mismas características entre terminales.

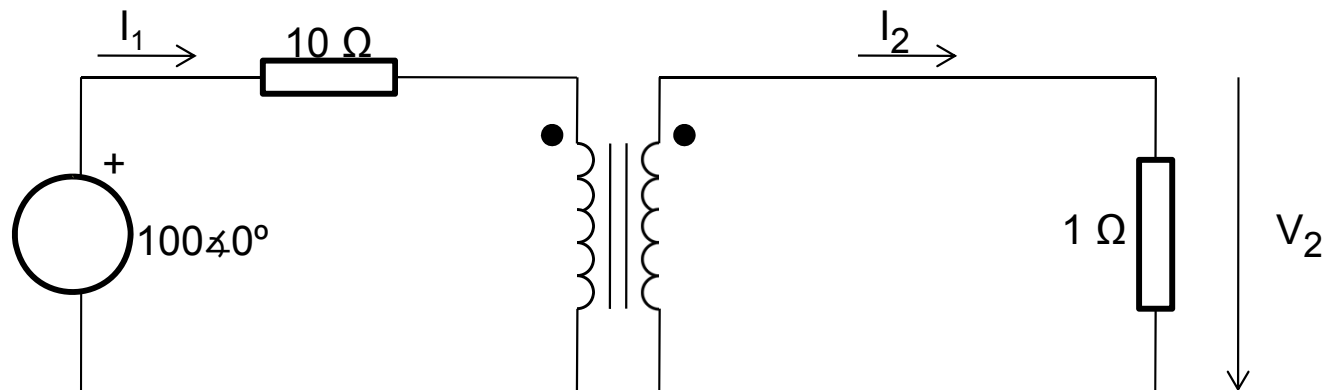
Después, se excluye el transformador del circuito y se resuelven las tensiones y corrientes.

Las **soluciones** obtenidas para la **porción de circuito** que no fue reemplazado serán los **valores correctos de tensiones y corrientes del circuito original**. Finalmente, **las tensiones y corrientes en el otro lado del transformador** (en el circuito original) **pueden hallarse por medio de la relación de transformación**.

El proceso de reemplazar un lado del transformador por su equivalente en el otro lado se conoce como referir el primero de los lados de un transformador al segundo de ellos.

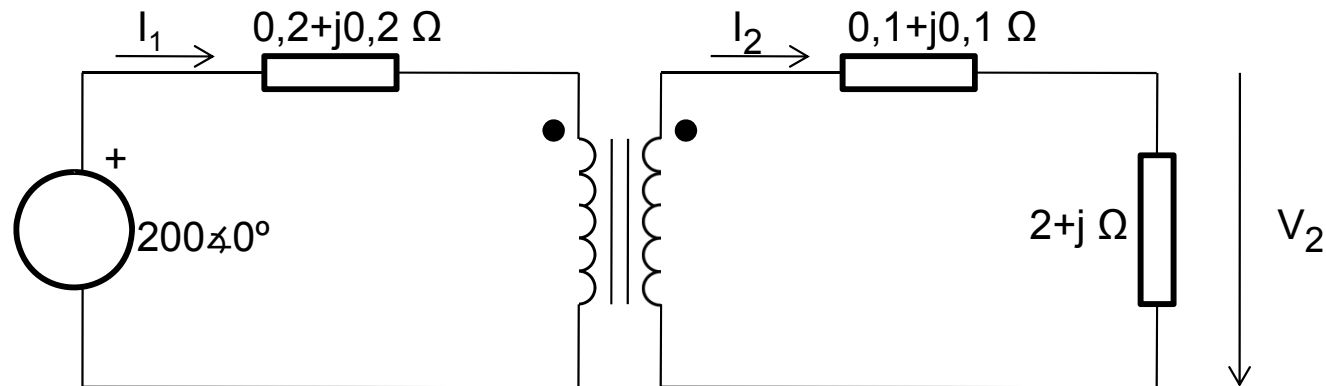
Análisis de circuitos que contienen transformadores ideales.

Ejemplo 2: Determinar el valor de la tensión V_2 si la relación de transformación es 2 ($a=N_1/N_2$).



Análisis de circuitos que contienen transformadores ideales.

Ejemplo 3: Determinar el valor de la tensión V_2 si la relación de transformación es 2 ($a=N_1/N_2$).

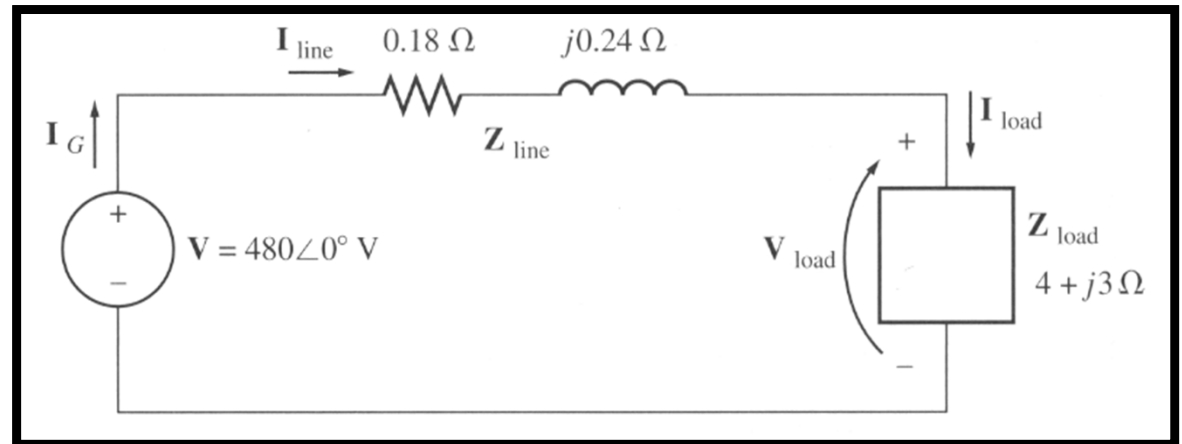


Análisis de circuitos que contienen transformadores ideales.

Ejemplo 4: Un sistema monofásico de potencia consta de un generador de 480V 60 Hz que alimenta una carga $Z_{carga} = 4 + j3 \Omega$ a través de una línea de transmisión de impedancia $Z_{línea} = 0,18 + j0,24 \Omega$. a) ¿Cuál será la tensión en la carga? ¿Cuáles serán las pérdidas en la línea de transmisión? b) Si se sitúan un transformador elevador 1:10 y un transformador reductor 10:1 al comienzo de la línea (lado generador) y al final de la misma (lado carga), respectivamente, ¿qué valdrán la tensión en bornes de la carga y las pérdidas en la línea?

a)

$$\begin{aligned}\vec{I}_G &= \vec{I}_{línea} = \vec{I}_{carga} = \frac{\vec{V}}{\vec{Z}_{línea} + \vec{Z}_{carga}} \\ &= \frac{480\angle 0^\circ}{0,18 + j0,24 + 4 + j3} \\ &= \frac{480\angle 0^\circ}{5,29\angle 37,8^\circ} = 90,8\angle -37,8^\circ \text{ A}\end{aligned}$$



Análisis de circuitos que contienen transformadores ideales.

Por tanto, la tensión en la carga valdrá:

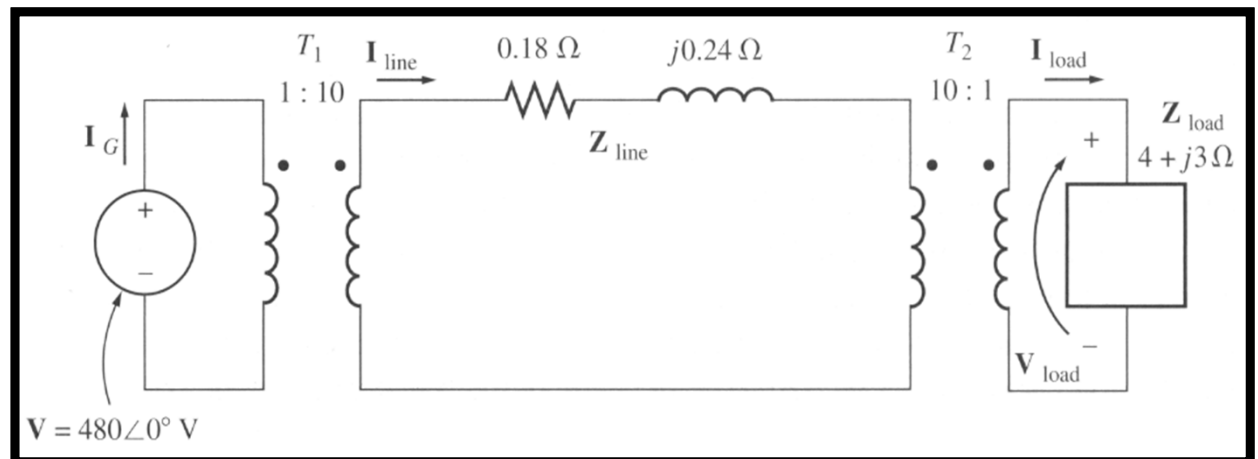
$$\vec{V}_{carga} = \vec{I}_{carga} \vec{Z}_{carga} = (90,8 \angle -37,8^\circ)(4 + j3) = (90,8 \angle -37,8^\circ)(5 \angle 36,9^\circ) = 454 \angle -0,9^\circ V$$

Las pérdidas en la línea serán:

$$P_{pérdidas} = I_{línea}^2 R_{línea} = 90,8^2 \cdot 0,18 = 1484 W$$

b) Pasos:

- 1) Eliminar el transformador T_2 refiriendo la carga al lado del transformador sobre la línea de transmisión.
- 2) Eliminar el transformador T_1 refiriendo los elementos de la línea de transmisión y el equivalente de la carga en la tensión de la línea de transmisión, al lado de la fuente.



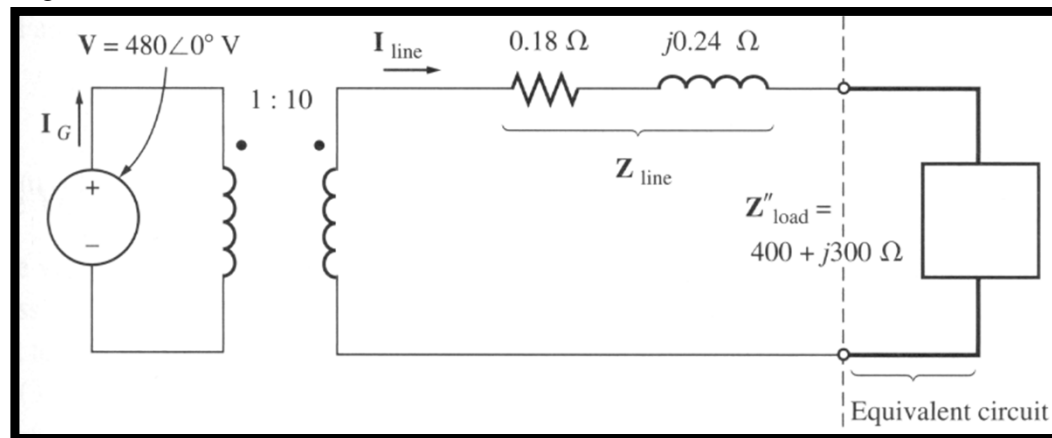
Análisis de circuitos que contienen transformadores ideales.

La impedancia de carga, cuando se refiere al lado de la línea es:

$$\vec{Z}''_{carga} = a_2^2 \vec{Z}_{carga} = \left(\frac{10}{1}\right)^2 (4 + j3) = 400 + j300$$

La impedancia total en el nivel de la línea de transmisión es:

$$\vec{Z}''_{eq} = \vec{Z}_{linea} + \vec{Z}''_{carga} = (0,18 + j0,24) + (400 + j300) = 400,18 + j300,24 = 500,3 \angle 36,88^\circ \Omega$$



La impedancia total se refiere, ahora, a través de T_1 al nivel de tensión de la fuente:

$$\vec{Z}'_{eq} = a_1^2 \vec{Z}''_{eq} = a_1^2 (\vec{Z}_{linea} + \vec{Z}''_{carga}) = \left(\frac{1}{10}\right)^2 (0,18 + j0,24) + (400 + j300)$$

$$\vec{Z}'_{eq} = (0,0018 + j0,0024) + (4 + j3)$$

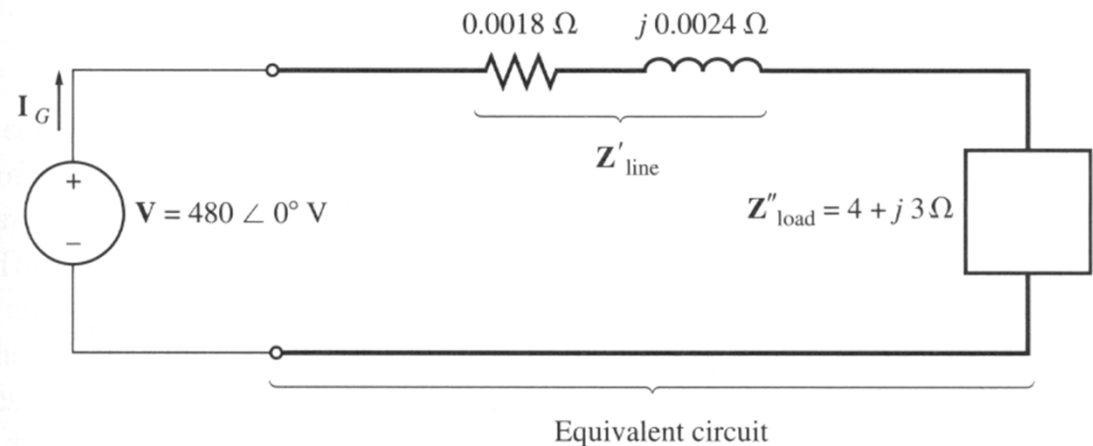
$$\vec{Z}'_{eq} = 5,003 \angle 36,88^\circ \Omega$$

Análisis de circuitos que contienen transformadores ideales.

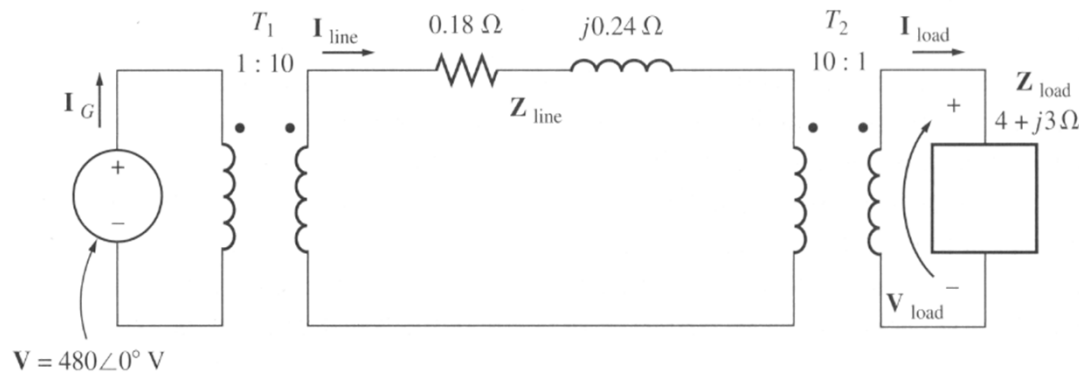
La corriente del generador es:

$$\vec{I}_G = \vec{I}_1 = \frac{\vec{V}}{\vec{Z}'_{eq}} = \frac{480 \angle 0^\circ}{5,003 \angle 36.88^\circ}$$

$$= 95,94 \angle -36,88^\circ \text{ A}$$



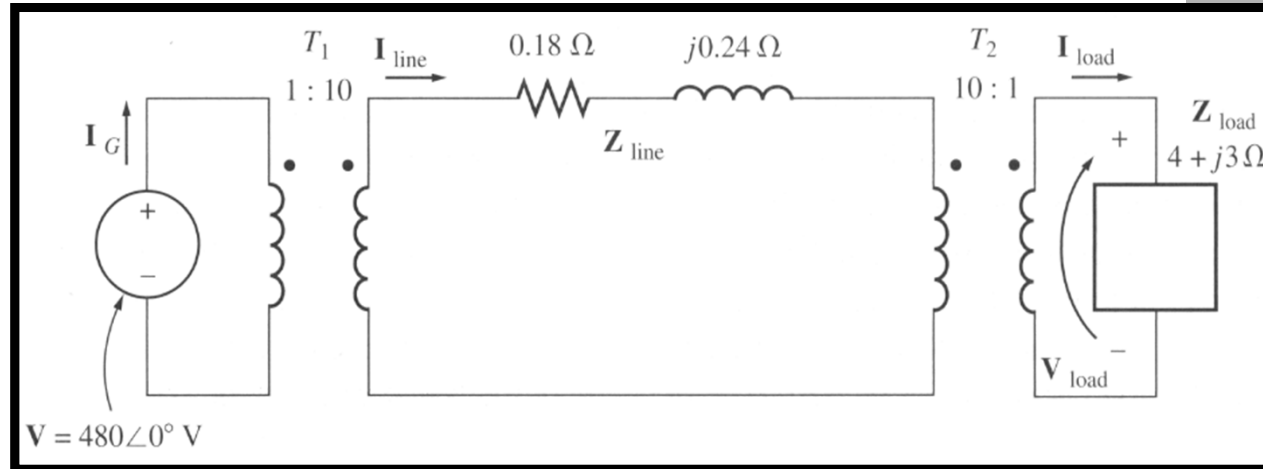
Conociendo las relaciones de transformación, se pueden determinar las corrientes por las línea y la carga:



$$\vec{I}_{linea} = a_1 \vec{I}_1 = 0,1 \cdot (95,94 \angle -36,88^\circ) = 9,594 \angle -36,88^\circ \text{ A}$$

$$\vec{I}_{carga} = a_2 \vec{I}_{linea} = 10 \cdot (9,594 \angle -36,88^\circ) = 95,94 \angle -36,88^\circ \text{ A}$$

Análisis de circuitos que contienen transformadores ideales.



Por tanto, la tensión en la carga vale:

$$\vec{V}_{\text{carga}} = \vec{I}_{\text{carga}} \vec{Z}_{\text{carga}} = (95,94 \angle -36,88^\circ)(5 \angle 36,87^\circ) = 479,7 \angle -0,01^\circ \text{ V}$$

Las pérdidas en la línea serán: $P_{\text{pérdidas}} = I_{\text{linea}}^2 R_{\text{linea}} = 9,594^2 \cdot 0,18 = 16,7 \text{ W}$

Nota: elevando la tensión en la línea se ha conseguido reducir las pérdidas en la misma aproximadamente en un 90%. Además, la tensión en la carga se aproxima mucho más al valor de la tensión en el generador –menor c.d.t. al elevar la tensión en la línea.

Teoría de operación de transformadores monofásicos reales

Las características de un transformador real se aproximan a las de un transformador ideal pero sólo hasta cierto punto. **La base de operación del transformador puede derivarse de la Ley de Faraday:**

$$e_{ind} = \frac{d\lambda}{dt}$$

Donde λ es el flujo ligado en la bobina a través de la cual se induce la tensión:

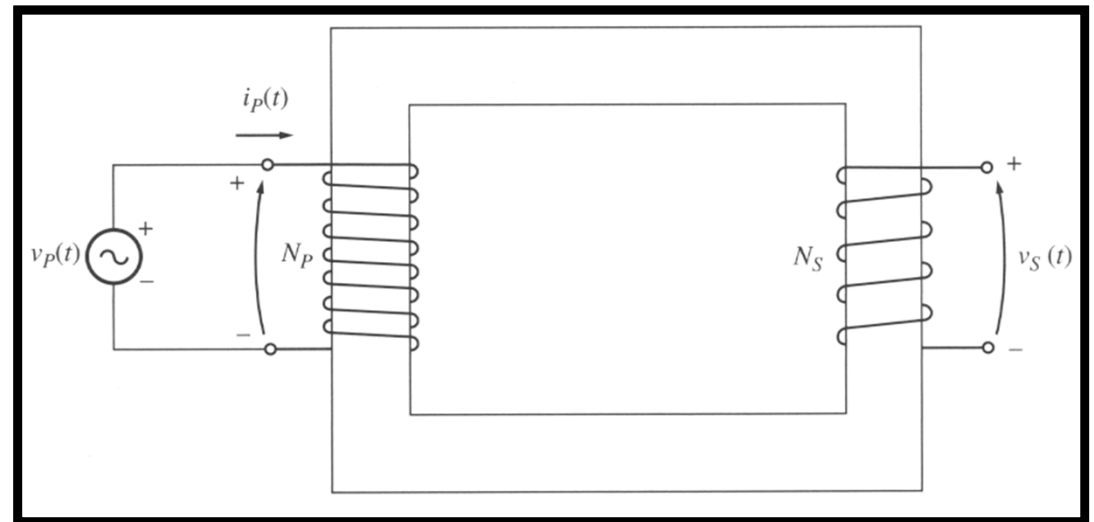
$$\lambda = \sum_{i=1}^N \phi_i$$

ϕ_i es el flujo que pasa a través de la i -ésima vuelta de la bobina. El flujo ligado no es justamente $N\phi$ ya que el flujo que pasa a través de cada vuelta de la bobina es ligeramente diferente al de las demás. Sin embargo, es posible definir el flujo medio en una bobina que contenga N espiras:

$$\bar{\phi} = \lambda/N$$

Por tanto:

$$e_{ind} = N \frac{d\bar{\phi}}{dt}$$



Relación de tensiones en el transformador real

Si la tensión de la fuente $v_p(t)$ se aplica al devanado de primario, el flujo medio presente en el devanado primario será:

$$\bar{\phi} = \frac{1}{N_p} \int v_p(t) dt$$

Una porción del flujo producido en la bobina primaria atraviesa la bobina secundaria (flujo mutuo); el resto se pierde (flujo dispersión en primario):

$$\bar{\phi}_p = \phi_m + \phi_{Lp}$$

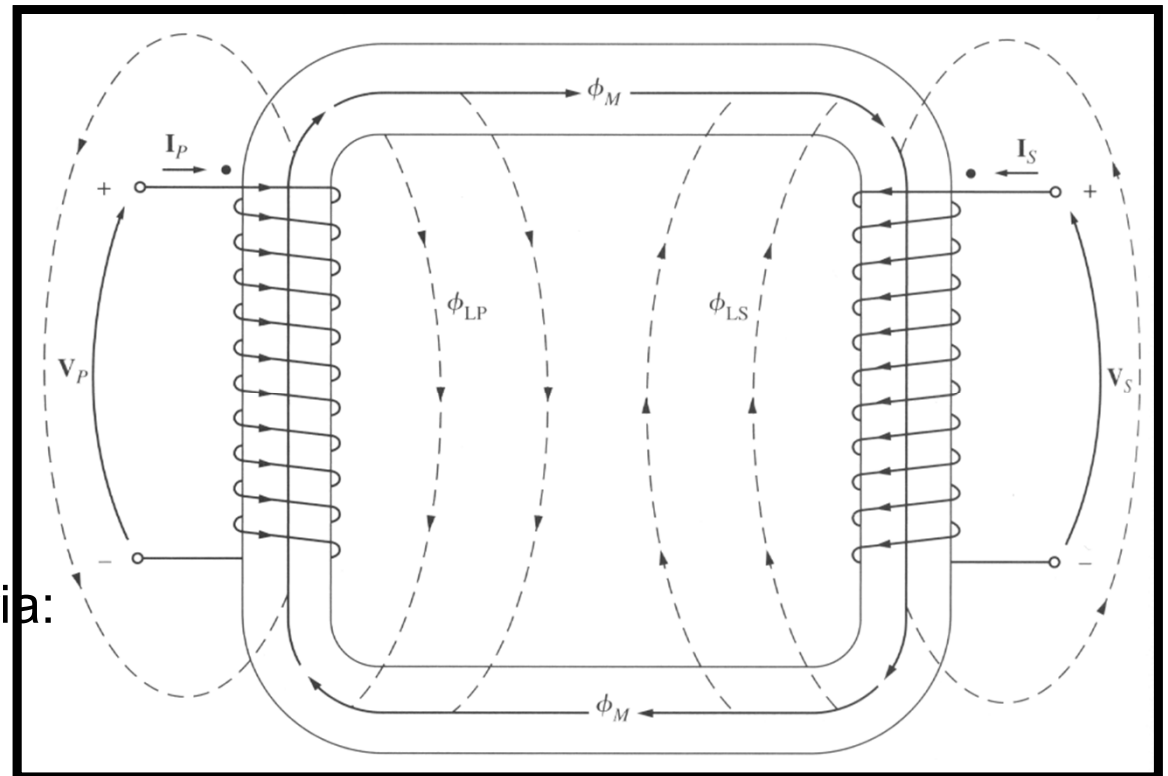
Flujo medio total devanado primario

flujo mutuo

Similarmente, para la bobina secundaria:

$$\bar{\phi}_s = \phi_m + \phi_{Ls}$$

Flujo medio total devanado secundario



Relación de tensiones en el transformador real

A partir de la Ley de Faraday, la tensión en la bobina del primario vale:

$$v_p(t) = N_p \frac{d\bar{\phi}_p}{dt} = N_p \frac{d\phi_m}{dt} + N_p \frac{d\phi_{Lp}}{dt} = e_p(t) + e_{Lp}(t)$$

La tensión en la bobina del secundario es:

$$v_s(t) = N_s \frac{d\bar{\phi}_s}{dt} = N_s \frac{d\phi_m}{dt} + N_s \frac{d\phi_{Ls}}{dt} = e_s(t) + e_{Ls}(t)$$

Las tensiones en el primario y secundario debidas al flujo mutuo son:

$$e_p(t) = N_p \frac{d\phi_m}{dt}$$

$$e_s(t) = N_s \frac{d\phi_m}{dt}$$

Combinando las últimas 2 ecuaciones:

$$\frac{e_p(t)}{N_p} = \frac{d\phi_m}{dt} = \frac{e_s(t)}{N_s}$$

Relación de tensiones en el transformador real

Por tanto:

$$\frac{e_p(t)}{e_s(t)} = \frac{N_p}{N_s} = a$$

Es decir, la relación de la tensión primaria a la tensión secundaria, ambas causadas por el flujo mutuo, es igual a la relación de transformación del transformador.

En transformadores bien diseñados:

$$\phi_m \gg \phi_{Lp}; \quad \phi_m \gg \phi_{Ls}$$

Por tanto, la siguiente aproximación normalmente se mantiene:

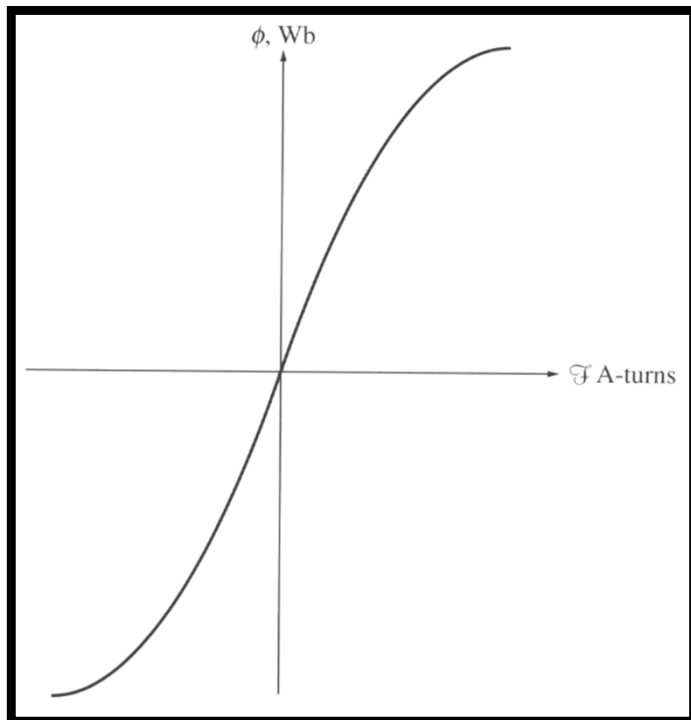
$$\frac{v_p(t)}{v_s(t)} \approx \frac{N_p}{N_s} \approx a$$



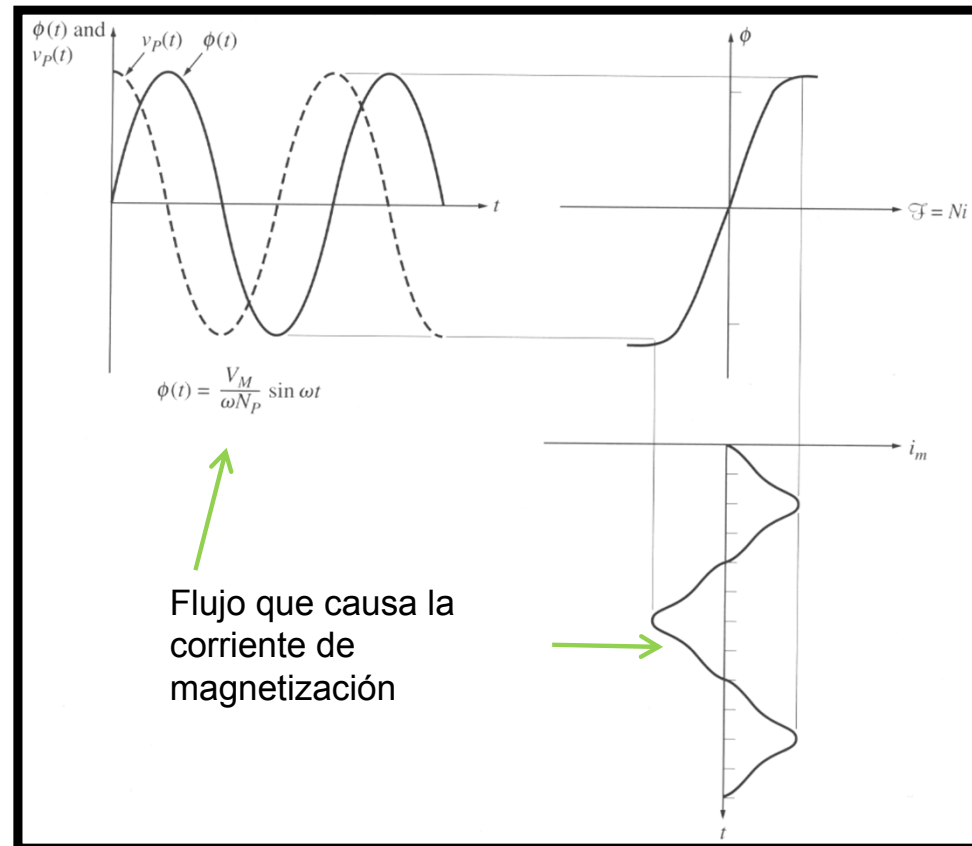
Corriente de excitación en un transformador real

Aún cuando el circuito secundario del transformador esté abierto (sin carga), existe una corriente que fluye por la bobina del primario. Esta corriente tiene 2 componentes:

1. La corriente de magnetización i_m necesaria para producir el flujo en el núcleo.
2. La corriente de pérdidas en el núcleo i_{h+e} debida al fenómeno de histéresis y a las corrientes parásitas.



Curva magnetización típica



Corriente de excitación en un transformador real

Ignorando el flujo disperso, el flujo medio en el núcleo vendrá dado por:

$$\bar{\phi} = \frac{1}{N_p} \int v_p(t) dt = \frac{1}{N_p} \int V_m \cos \omega t dt = \frac{V_m}{\omega N_p} \text{sen} \omega t \quad [\text{Wb}]$$

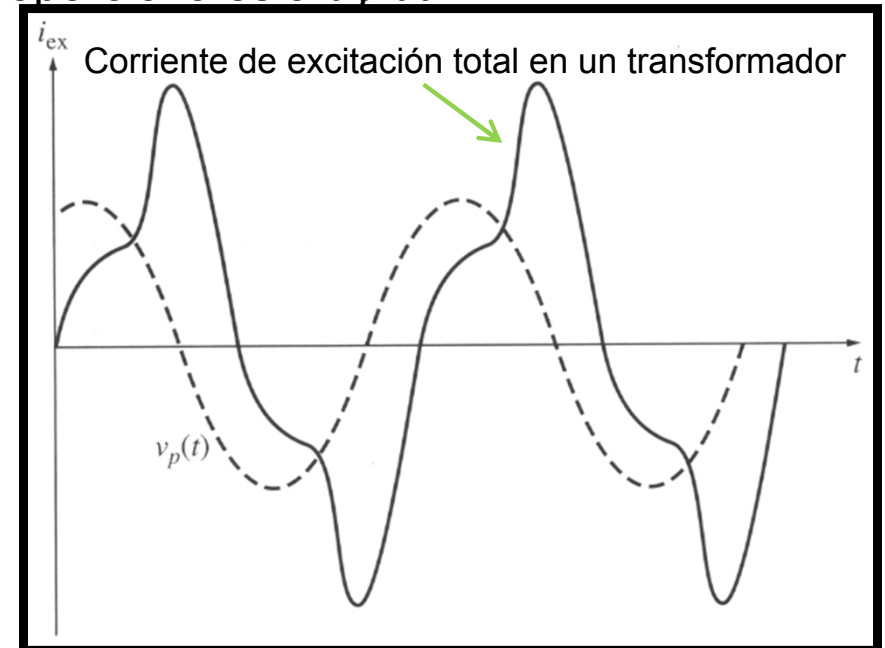
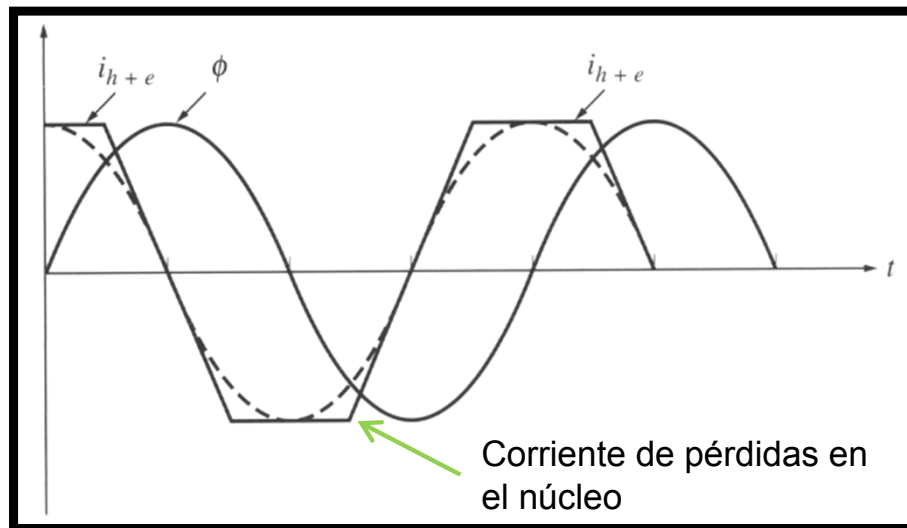
Si los valores de la corriente se comparan con el flujo del núcleo para diferentes instantes de tiempo, es posible construir la gráfica que muestra la **corriente de magnetización del transformador**.

En la gráfica se observa:

1. La corriente de magnetización no es senoidal: existen componentes de alta frecuencia debidas a la saturación del núcleo.
2. Una vez se alcanza la saturación en el núcleo, un pequeño incremento en el flujo precisa de un fuerte incremento de la corriente de magnetización.
3. La corriente de magnetización (la componente fundamental) retrasa 90° con respecto a la tensión aplicada.
4. Cuanto mayor sea el proceso de saturación del núcleo, mayores serán las componentes armónicas de la corriente de magnetización.

Corriente de excitación en un transformador real

Si se asume un flujo senoidal en el núcleo, las **corrientes de pérdidas** serán máximas cuando el flujo pasa por cero, ya que son proporcionales a $d\phi/dt$



La corriente de pérdidas:

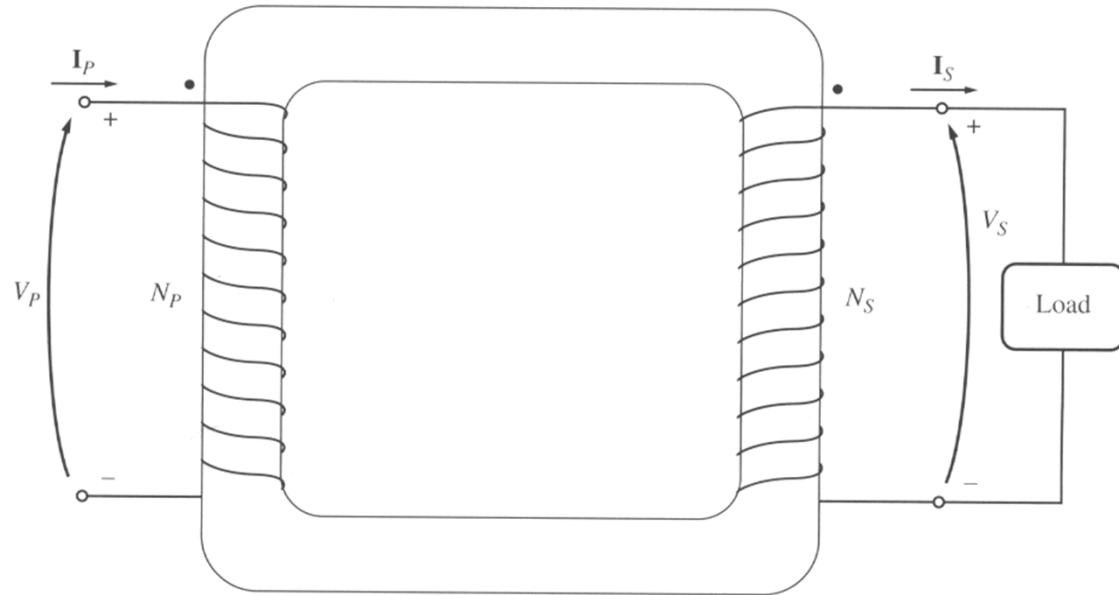
1. Es no lineal debido a los efectos no lineales de la histéresis
2. Está en fase con la tensión.

La corriente total de vacío en el núcleo recibe el nombre de **corriente de excitación del transformador**:

$$i_{ex} = i_m + i_{h+e}$$

La relación de corrientes en un transformador real

Si se conecta una carga al secundario del transformador, tendremos una corriente I_s fluyendo por este devanado.

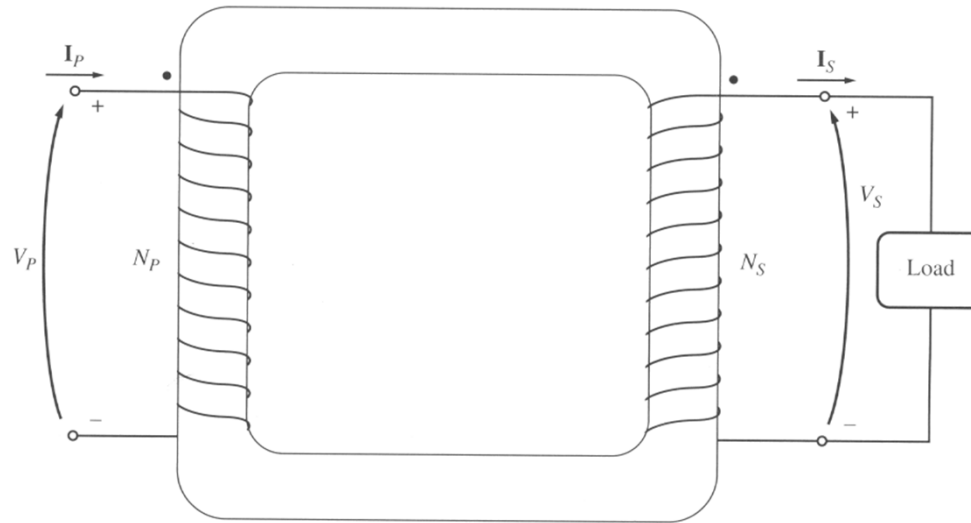


Una corriente que fluye hacia un devanado, por su extremo marcado con un punto, producirá una f.m.m. (F) positiva. Mientras, que si la corriente fluye hacia dentro del devanado por el extremo no marcado con punto, producirá una f.m.m negativa.

$$F_p = N_p i_p$$

$$F_s = N_s i_s$$

La relación de corrientes en un transformador real



La fuerza magnetomotriz neta en el núcleo del transformador valdrá:

$$F_{neta} = N_p i_p - N_s i_s = \phi \mathcal{R}$$

donde \mathcal{R} es la reluctancia del núcleo del transformador. Para núcleos bien diseñados, la reluctancia es muy pequeña si el núcleo no se encuentra saturado. Por tanto:

$$F_{neta} = N_p i_p - N_s i_s \approx 0$$

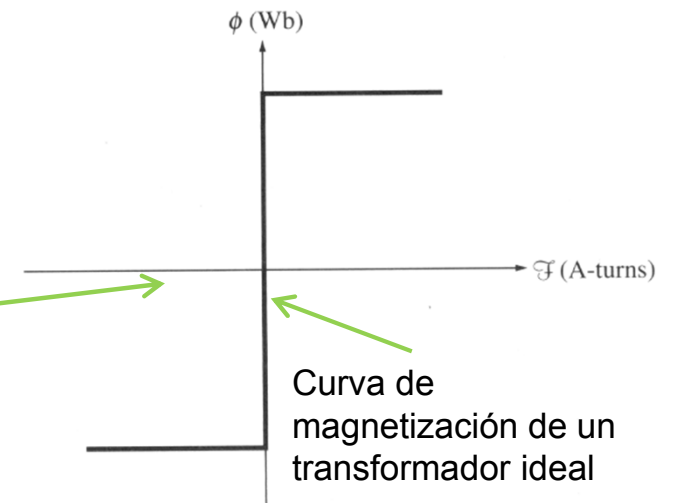
La relación de corrientes en un transformador real

Para núcleos de transformadores bien diseñados (no saturados), tendremos, pues:

$$N_p i_p \approx N_s i_s \Rightarrow \frac{i_p}{i_s} \approx \frac{N_s}{N_p} = \frac{1}{a}$$

Un transformador ideal se puede caracterizar como sigue:

1. El núcleo carece de histéresis o corrientes parásitas.
2. La curva de magnetización es
3. El flujo de dispersión en el núcleo es cero.
4. La resistencia en los devanados es cero.



El circuito equivalente del transformador

Para modelar un transformador real con precisión, se precisa contabilizar las siguientes pérdidas:

1. **Pérdidas en el cobre** → pérdidas por efecto Joule en devanados: I^2R .
2. **Pérdidas por corrientes parásitas** → pérdidas por calentamiento en el núcleo: son proporcionales al cuadrado de la tensión aplicada al trafo.
3. **Pérdidas por histéresis** → energía necesaria para reordenar los dominios magnéticos en el núcleo: función no lineal de la tensión aplicada al trafo.
4. **Flujo de dispersión** → flujo que escapa del núcleo y que pasa únicamente a través de uno de los devanados del transformador.



El circuito equivalente exacto de un transformador real

Las pérdidas en el cobre se modelan mediante las resistencias R_p y R_s .

El flujo disperso en el devanado primario produce la tensión:

$$e_{Lp}(t) = N_p \frac{d\phi_{Lp}}{dt}$$

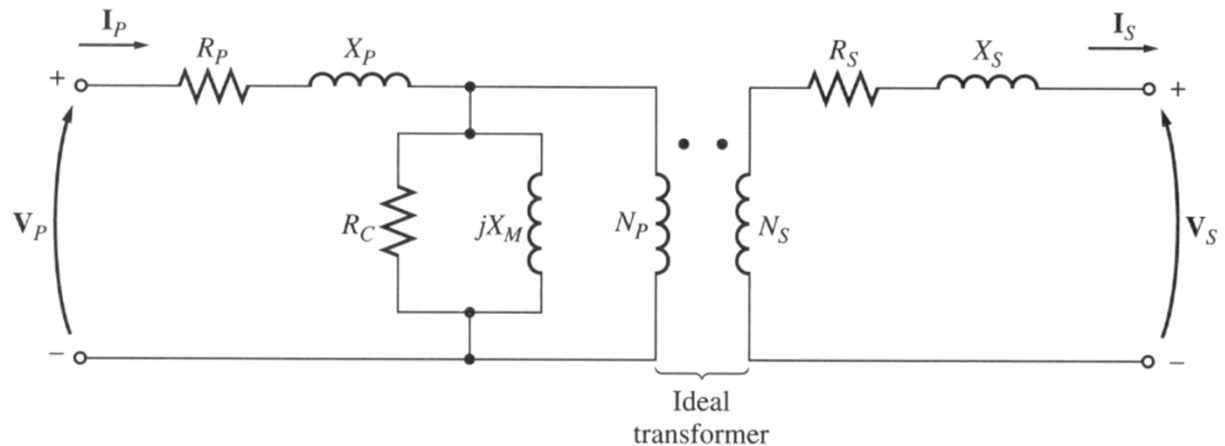
Como gran parte del flujo disperso es a través del aire, y el aire posee una reluctancia constante que es mucho mayor que la del núcleo, el flujo disperso en el devanado de primario valdrá:

$$\phi_{Lp} = \mathcal{P} N_p i_p$$

permeancia del camino del flujo

Por tanto:

$$e_{Lp}(t) = N_p \frac{d}{dt} (\mathcal{P} N_p i_p) = N_p^2 \mathcal{P} \frac{di_p}{dt}$$



El circuito equivalente exacto de un transformador real

Reconociendo que la autoinducción de la bobina del primario es:

$$L_p = N_p^2 \mathcal{P}$$

Las tensiones inducidas serán:

Devanado primario:

$$e_{L_p}(t) = L_p \frac{di_p}{dt}$$

Devanado secundario:

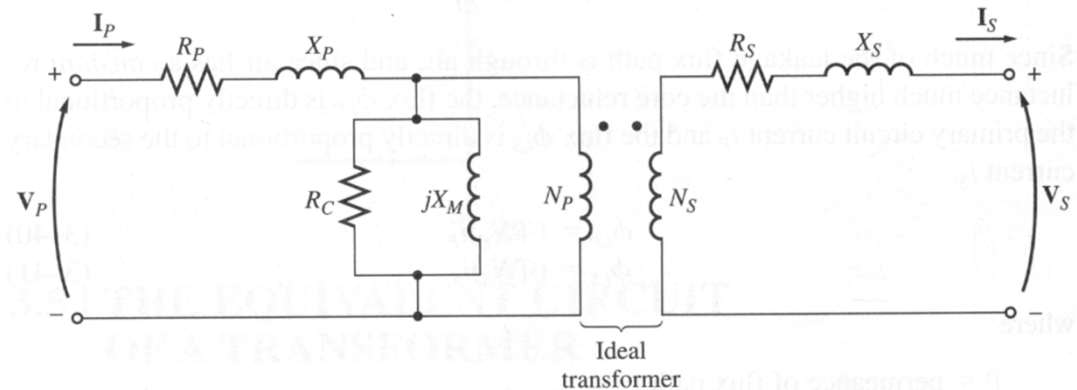
$$e_{L_s}(t) = L_s \frac{di_s}{dt}$$

- ✓ *El flujo de dispersión se puede modelar por inductancias en el primario y el secundario.*
- ✓ *La corriente de magnetización se puede modelar por una reactancia X_M conectada a través de la fuente de tensión del primario.*
- ✓ *La corriente de pérdidas en el núcleo se puede modelar por una resistencia R_C conectada a través de la fuente de tensión del primario.*
- ✓ *Ambas corrientes son no lineales, por tanto, X_M y R_C son aproximaciones.*

El circuito equivalente exacto de un transformador real

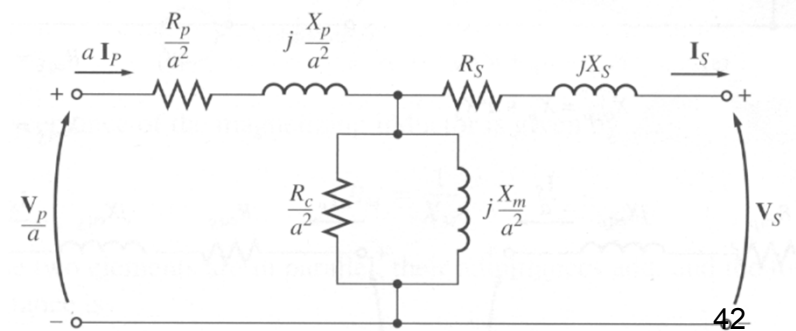
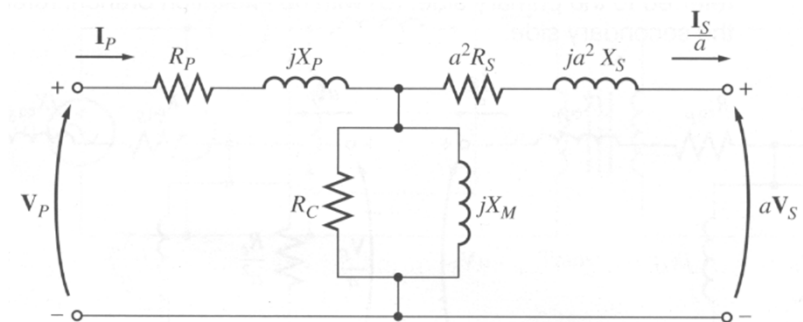
Circuito equivalente exacto del trafo real

Este circuito exacto no es muy práctico. Por tanto, el circuito equivalente normalmente se refiere al lado de primario o de secundario.



Circuito equivalente del transformador referido al lado de primario

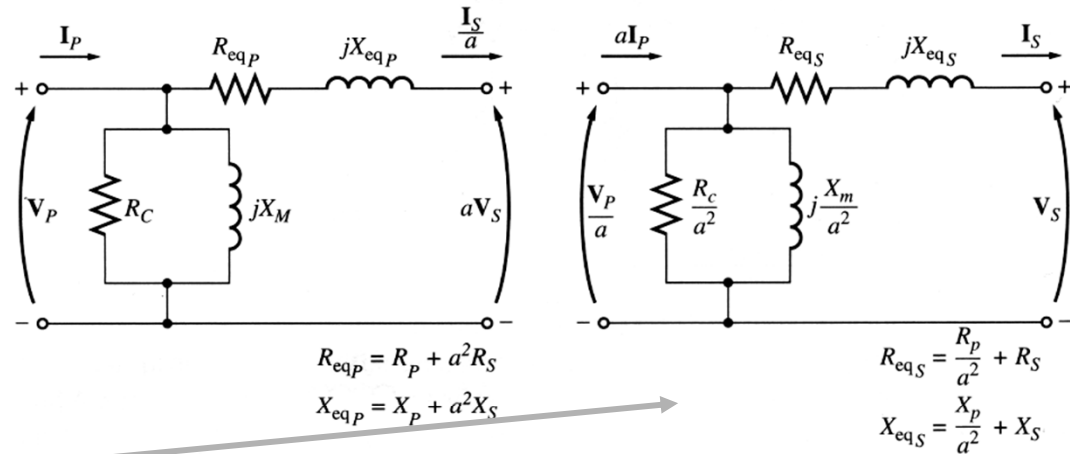
Circuito equivalente del transformador referido al lado de secundario



Circuito equivalente aproximado de un transformador

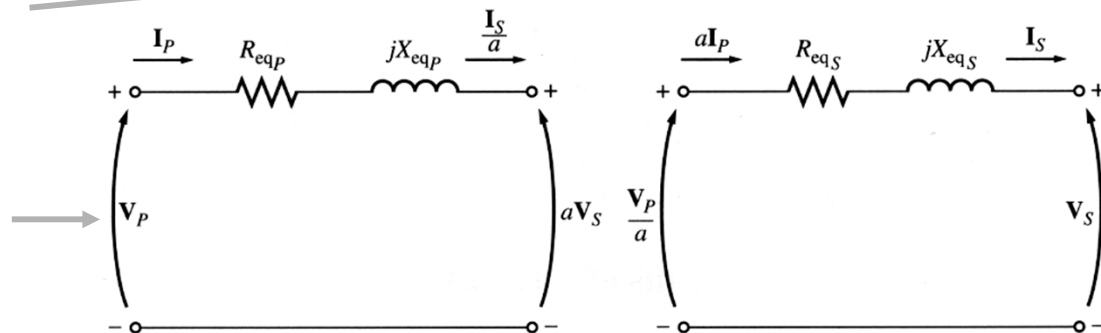
En muchas aplicaciones prácticas, se utilizan **modelos aproximados** de los transformadores.

Referido al lado de primario



Referido al lado de secundario

Sin la rama de excitación referido al lado de primario



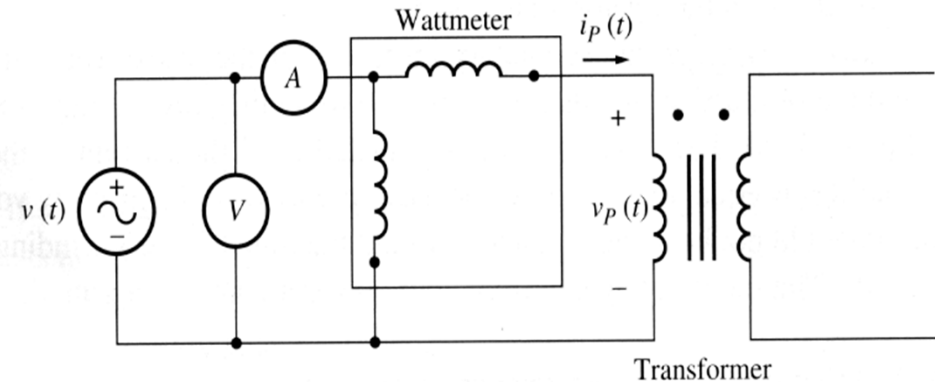
Sin rama de excitación referido al lado de secundario

Los valores o parámetros que modelan el comportamiento del trafo se pueden determinar experimentalmente mediante pruebas a circuito abierto o en cortocircuito.

Determinación de los parámetros de un transformador

La prueba a circuito abierto

El lado de primario del transformador se conecta a la tensión nominal de funcionamiento. Se miden la tensión, corriente y potencia de entrada.



Con esta información es posible determinar el factor de potencia, la magnitud y el ángulo de la impedancia de excitación.

Para evaluar R_C y X_M , se determina la conductancia de la resistencia de pérdidas en el núcleo:

$$G_C = \frac{1}{R_C}$$

La susceptancia de la inductancia de magnetización es:

$$B_M = \frac{1}{X_M}$$

Determinación de los parámetros de un transformador

Puesto que estos dos elementos están en paralelo, sus admitancias se suman. Por tanto, la **admitancia total de la excitación** vale:

$$Y_E = G_C - jB_M = \frac{1}{R_C} - j \frac{1}{X_M}$$

La magnitud de la admitancia de excitación (referida al primario) mediante la prueba en circuito abierto valdrá:

$$|Y_E| = \frac{I_o}{V_o}$$

El ángulo de la admitancia en la prueba a circuito abierto se puede determinar a partir del factor de potencia (f.d.p.):

$$\cos \theta = f.d.p. = \frac{P_o}{V_o I_o}$$



Determinación de los parámetros de un transformador

En transformadores reales, el factor de potencia está siempre en retraso, por tanto el ángulo de la corriente siempre retrasa con respecto a la tensión en θ grados. Por tanto, la admitancia será:

$$Y_E = \frac{I_o}{V_o} \angle -\theta = \frac{I_o}{V_o} \angle -\cos^{-1} f.d.p.$$

Por tanto, es posible determinar los valores de R_C y X_M mediante la prueba a circuito abierto.

Determinación de los parámetros de un transformador

La prueba de cortocircuito

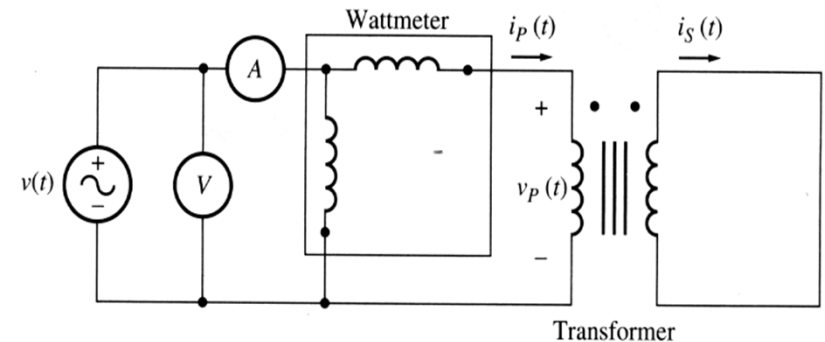
La tensión de entrada se ajusta hasta que la corriente de los devanados cortocircuitados sea igual a su valor nominal.

La tensión de entrada, la corriente y la potencia son nuevamente medidos.

Puesto que la tensión de entrada es muy pequeña durante la prueba, la corriente que fluye por la rama de excitación es despreciable; por tanto, toda la c.d.t. en el transformador puede ser atribuida a los elementos del circuito serie. La magnitud de las impedancias serie, referidas al lado de primario del transformador, vale:

$$|Z_{SE}| = \frac{V_{CC}}{I_{CC}}$$

El factor de potencia vendrá dado por: $f.d.p. = \cos \theta = \frac{P_{CC}}{V_{CC} I_{CC}}$



Determinación de los parámetros de un transformador

Por tanto:

$$Z_{SE} = \frac{V_{CC} \angle 0^\circ}{I_{CC} \angle -\theta^\circ} = \frac{V_{CC}}{I_{CC}} \angle \theta^\circ$$

Como la impedancia serie Z_{SE} es igual a:

$$Z_{SE} = R_{eq} + jX_{eq}$$

$$Z_{SE} = (R_p + a^2 R_s) + j(X_p + a^2 X_s)$$

es posible determinar la impedancia serie total referida al primario del transformador. Sin embargo, no hay un camino fácil para dividir las impedancias serie en sus componentes primaria o secundaria.

Estas pruebas también pueden ser realizadas en el lado secundario del transformador. Los resultados darán las impedancias del circuito equivalente referidas al secundario del transformador.



Determinación de los parámetros de un transformador. Ejemplo

Ejemplo 4: Determinar las impedancias del circuito equivalente de un transformador de 20 kVA, 8000/240 V, 60 Hz. Las pruebas de circuito abierto y cortocircuito dieron los siguientes resultados:

$V_o = 8000 \text{ V}$	$V_{CC} = 489 \text{ V}$
$I_o = 0,214 \text{ A}$	$I_{CC} = 2,5 \text{ A}$
$P_o = 400 \text{ W}$	$P_{CC} = 240 \text{ W}$

El factor de potencia durante la prueba de circuito abierto vale:

$$f.d.p. = \cos \theta = \frac{P_o}{V_o I_o} = \frac{400}{8000 \cdot 0,214} = 0,234 \text{ en retraso}$$

La admitancia de excitación vendrá dada por:

$$Y_E = \frac{I_o}{V_o} \angle -\cos^{-1} f.d.p. = 0,0000063 - j0,0000261 = \frac{1}{R_C} - j\frac{1}{X_M}$$

Determinación de los parámetros de un transformador. Ejemplo

Por tanto: $R_C = \frac{1}{0,0000063} = 159 \text{ k}\Omega$; $X_M = \frac{1}{0,0000261} = 38,3 \text{ k}\Omega$

El factor de potencia durante la prueba de cortocircuito ha sido:

$$f.d.p. = \cos \theta = \frac{P_{CC}}{V_{CC} I_{CC}} = \frac{240}{489 \cdot 2,5} = 0,196 \text{ en retraso}$$

La impedancia serie viene dada por:

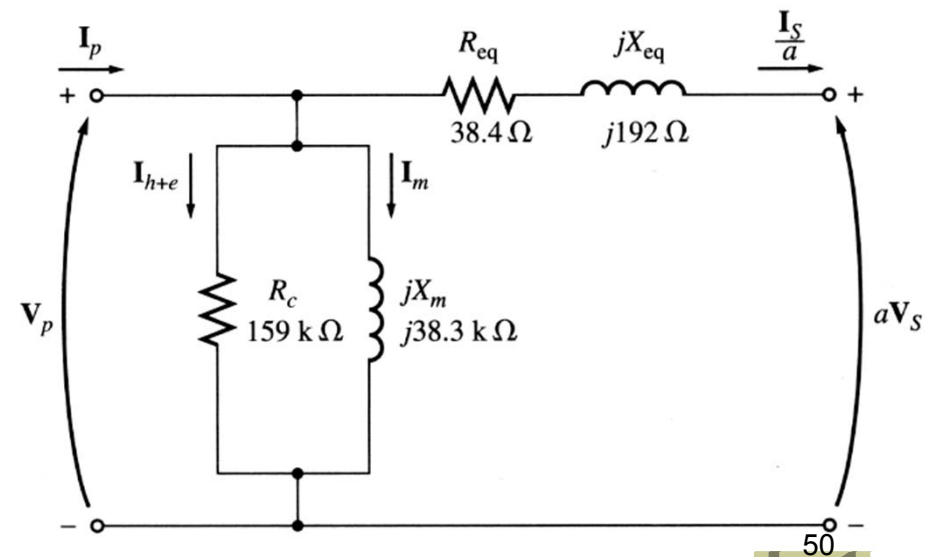
$$Z_{SE} = \frac{V_{CC}}{I_{CC}} \angle \cos^{-1} f.d.p. = \frac{489}{2,5} \angle 78,7^\circ$$

$$= 38,4 + j192 \Omega$$

Por tanto:

$$R_{eq} = 38,3 \Omega; \quad X_{eq} = 192 \Omega$$

Circuito equivalente



Regulación de tensión y eficiencia del transformador

Puesto que un transformador real contiene impedancias en serie, la tensión de salida varía con la carga, aunque la tensión de entrada permanezca constante. Para comparar adecuadamente transformadores en este aspecto, se define un ratio llamado **regulación de tensión a plena carga (VR)**:

$$VR(\%) = \frac{V_{s,vacio} - V_{s,plena_carga}}{V_{s,plena_carga}} \cdot 100 = \frac{V_p / a - V_{s,plena_carga}}{V_{s,plena_carga}} \cdot 100$$

Donde $V_{s,vacio}$ y $V_{s,plena_carga}$ son las tensiones de salida del transformador en vacío y a plena carga, respectivamente.

Nota: la VR de un transformador ideal es cero

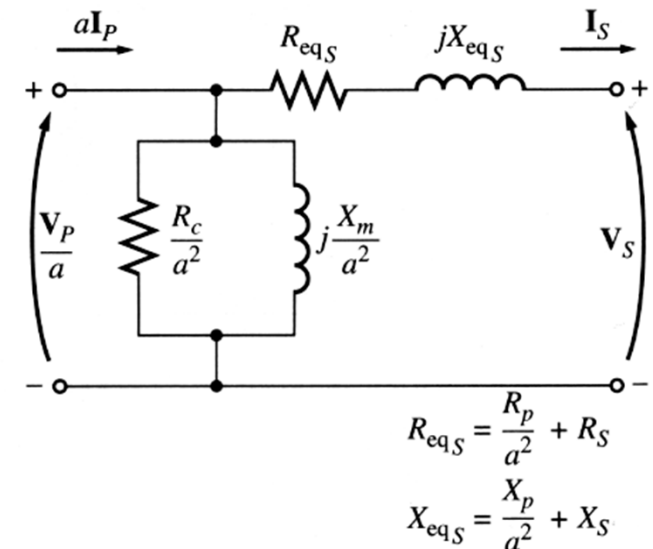


Diagrama fasorial del transformador

Para determinar la VR de un transformador, es necesario entender las c.d.t. que tienen lugar dentro de él. **Normalmente, los efectos de la rama de excitación sobre la VR del transformador pueden ser ignorados**, de manera que sólo es necesario considerar las impedancias serie. **La VR depende, tanto de la magnitud de las impedancias serie como del ángulo de fase de la corriente que fluye por el transformador.**

Para la determinación de VR, a menudo, se usa un diagrama fasorial. **Se supone que el ángulo de fase del fasor tensión V_s es 0° .** Las demás tensiones y corrientes se comparan con esta referencia.

Si se aplica la 2ª Ley de Kirchhoff al circuito equivalente de la figura, tenemos que la tensión en el primario vale:

$$\frac{\vec{V}_p}{a} = \vec{V}_s + R_{eq} \vec{I}_s + jX_{eq} \vec{I}_s$$

El diagrama fasorial del transformador viene a ser una representación gráfica de la anterior ecuación

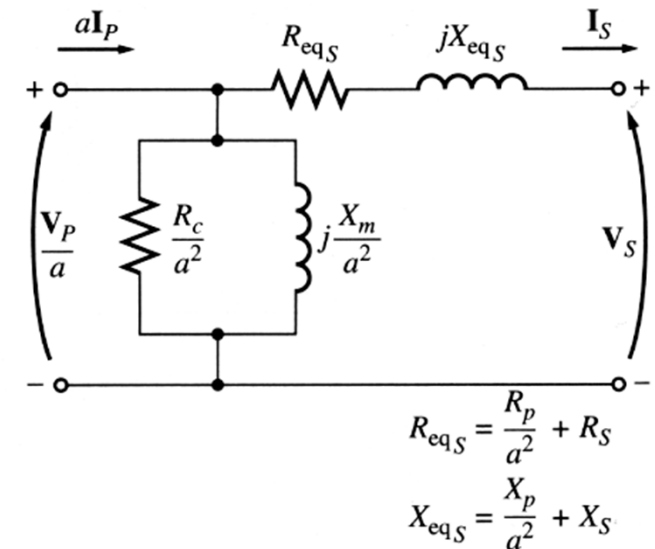


Diagrama fasorial del transformador

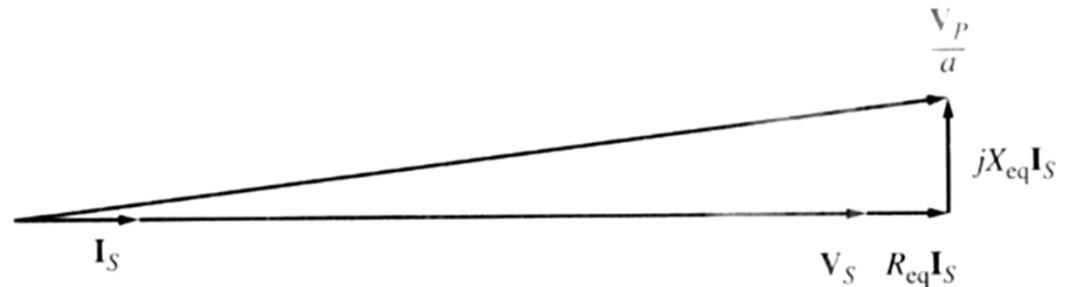
Transformador operando con un f.d.p. en retraso:

Se observa que $V_p/a > V_s$, $VR > 0$



Transformador operando con un f.d.p. igual a 1:

Se aprecia que $VR > 0$



Transformador operando con un f.d.p. en adelanto:

Si la corriente en el secundario está en adelanto, la tensión del secundario puede ser mayor que la tensión de primario de referencia. En este caso $VR < 0$.

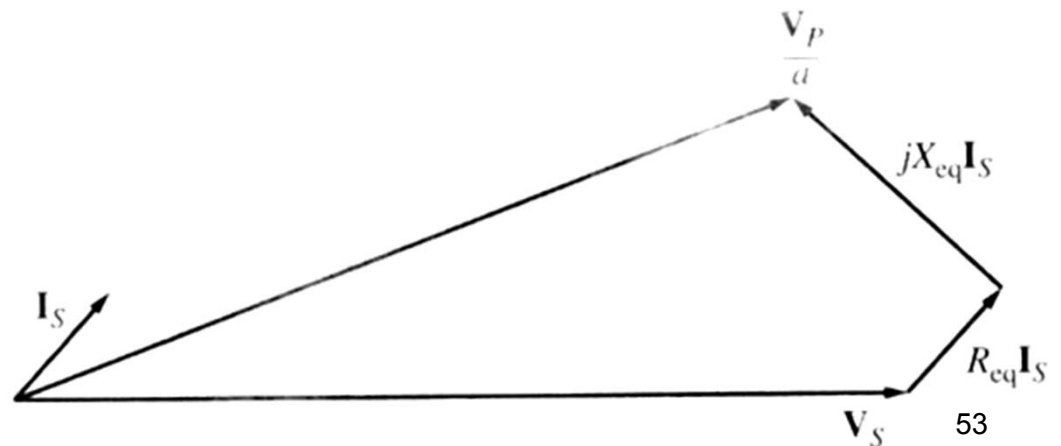
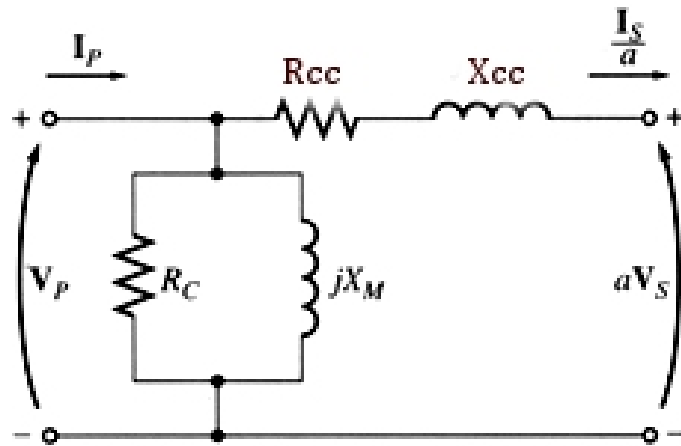


Diagrama fasorial del transformador.

Aproximación de Kapp

Si usamos el diagrama equivalente del transformador referido al primario para calcular VR, tendremos:



$$R_{CC} = R_p + a^2 R_s \quad \Rightarrow \text{resistencia de cortocircuito}$$

$$X_{CC} = X_p + a^2 X_s \quad \Rightarrow \text{reactancia de cortocircuito}$$

$$\vec{Z}_{CC} = R_{CC} + jX_{CC} \quad \Rightarrow \text{impedancia de cortocircuito}$$

$$\vec{V}_p = a\vec{V}_s + R_{CC} \frac{\vec{I}_s}{a} + jX_{CC} \frac{\vec{I}_s}{a}$$

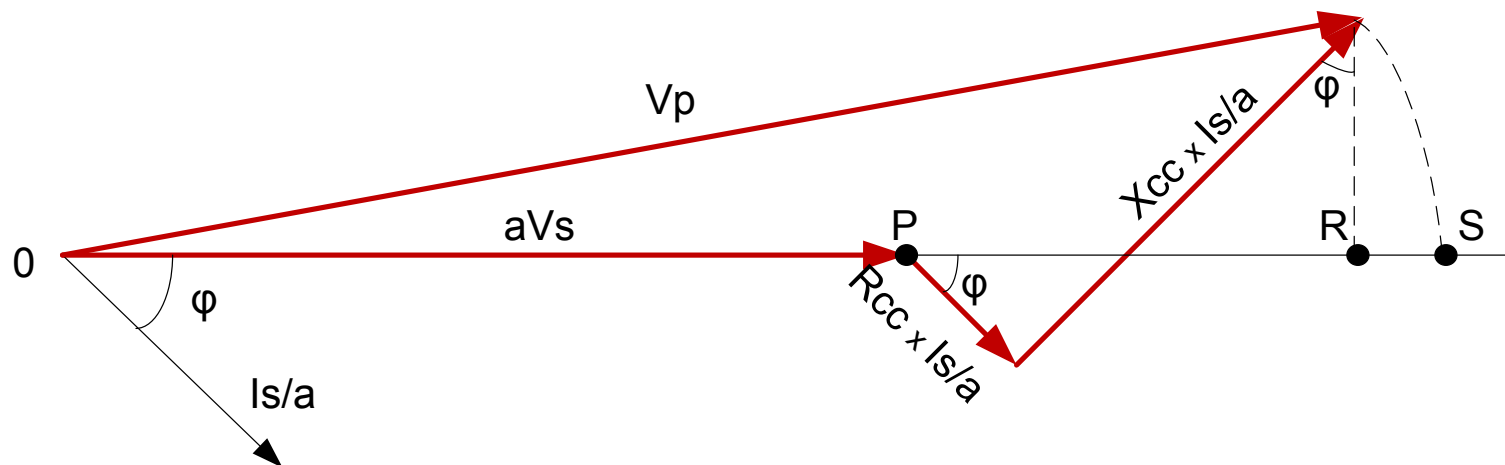
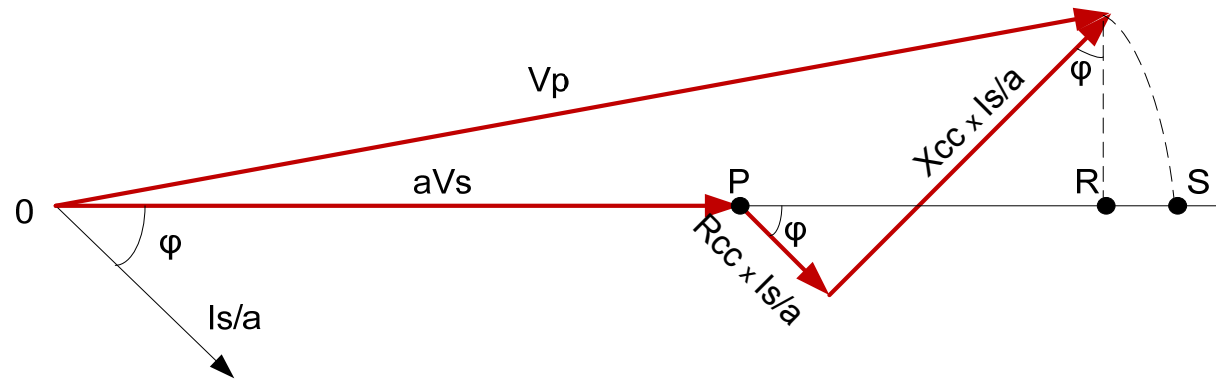


Diagrama fasorial del transformador. Aproximación de Kapp



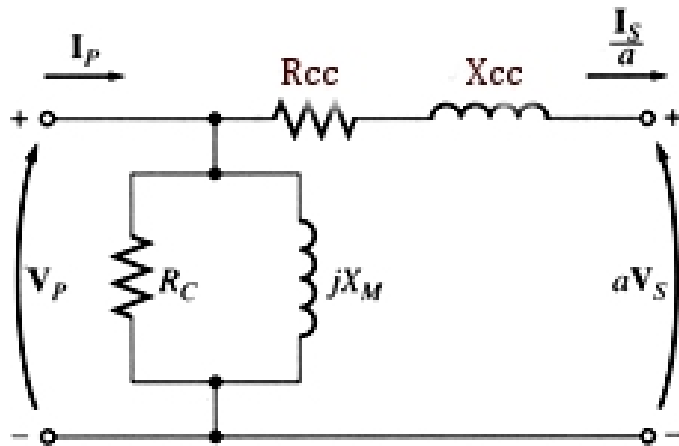
En la práctica, como la c.d.t. en un transformador es de un valor reducido (<10%), Kapp propuso el siguiente método aproximado que prescinde de la ecuación fasorial:

$$|\vec{V}_p| - |a\vec{V}_s| = \overline{OS} - \overline{OP} = \overline{PS} \approx \overline{PR} \quad \Rightarrow \quad \overline{PR} = R_{cc} \frac{I_s}{a} \cos \varphi + X_{cc} \frac{I_s}{a} \operatorname{sen} \varphi$$

Por tanto:

$$|\vec{V}_p| = a|\vec{V}_s| + R_{cc} \frac{I_s}{a} \cos \varphi + X_{cc} \frac{I_s}{a} \operatorname{sen} \varphi$$

Tensiones relativas de cortocircuito



$$R_{CC} = R_p + a^2 R_s \quad \Rightarrow \text{resistencia de cortocircuito}$$

$$X_{CC} = X_p + a^2 X_s \quad \Rightarrow \text{reactancia de cortocircuito}$$

$$\vec{Z}_{CC} = R_{CC} + jX_{CC} \quad \Rightarrow \text{impedancia de cortocircuito}$$

$$\vec{V}_p = a\vec{V}_s + (R_{CC} + jX_{CC}) \frac{\vec{I}_s}{a}$$

$$\varepsilon_{R_{CC}} (\%) = \frac{R_{CC} \cdot I_{pN}}{V_{pN}} \cdot 100 = \frac{P_{CuN}}{S_N} \cdot 100$$

$$\varepsilon_{X_{CC}} (\%) = \frac{X_{CC} \cdot I_{pN}}{V_{pN}} \cdot 100$$

$$\varepsilon_{CC} (\%) = \frac{Z_{CC} \cdot I_{pN}}{V_{pN}} \cdot 100$$

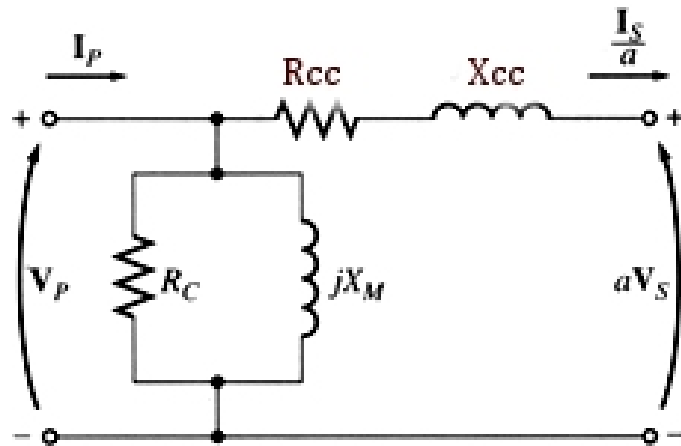
I_{pN} = intensidad nominal primario

V_{pN} = tensión nominal primario

P_{CuN} = pérdidas en cobre nominales

$$\varepsilon_{CC} (\%) \approx \varepsilon_{R_{CC}} (\%) \cdot \cos \varphi + \varepsilon_{X_{CC}} (\%) \cdot \text{sen} \varphi$$

Tensiones relativas de cortocircuito



$$\varepsilon_{R_{CC}} (\%) = \frac{R_{CC} \cdot I_{pN}}{V_{pN}} \cdot 100$$

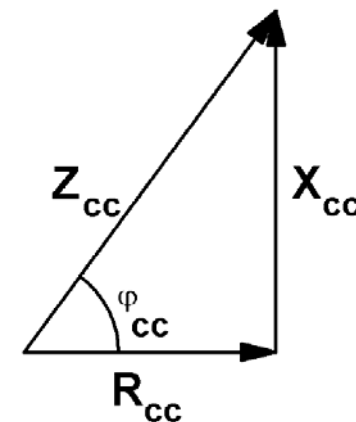
$$\varepsilon_{CC} (\%) = \frac{Z_{CC} \cdot I_{pN}}{V_{pN}} \cdot 100$$

$$\varepsilon_{X_{CC}} (\%) = \frac{X_{CC} \cdot I_{pN}}{V_{pN}} \cdot 100$$

Los parámetros Z_{CC} , R_{CC} y X_{CC} son muy diferentes de unos transformadores a otros, mientras que los valores relativos no varían tanto

$$S_N \leq 1000 \text{ kVA} \Rightarrow 1\% \leq \varepsilon_{CC} \leq 6\%$$

$$S_N > 1000 \text{ kVA} \Rightarrow 6\% \leq \varepsilon_{CC} \leq 13\%$$



Eficiencia del transformador

La eficiencia del transformador se define como:

$$\eta(\%) = \frac{P_{salida}}{P_{entrada}} \cdot 100 = \frac{P_{salida}}{P_{salida} + P_{perdidas}} \cdot 100$$

Nota: esta misma ecuación describe la eficiencia de motores y generadores

Tomando como base el circuito equivalente del transformador, se observan tres tipos de pérdidas:

1. Pérdidas en el cobre (I^2R) – contabilizadas por la resistencia en serie del circuito equivalente
2. Pérdidas por histéresis – contabilizadas por la resistencia R_c .
3. Pérdidas por corrientes parásitas – contabilizadas por la resistencia R_c .

Como la potencia de salida es: $P_{salida} = V_s I_s \cos \theta_s$

La eficiencia del transformador será:

$$\eta(\%) = \frac{V_s I_s \cos \theta}{P_{Cu} + P_{nucleo} + V_s I_s \cos \theta} \cdot 100$$

Eficiencia del transformador.

Ejemplo

Ejemplo 5: Se prueba un transformador de 15 kVA, 2300/230 V para determinar sus componentes de la rama de excitación, sus impedancias serie y su regulación de tensión, obteniéndose los siguientes datos (ref. al primario):

$V_O = 2300 \text{ V}$	$V_{CC} = 47 \text{ V}$
$I_O = 0,21 \text{ A}$	$I_{CC} = 6,0 \text{ A}$
$P_O = 50 \text{ W}$	$P_{CC} = 160 \text{ W}$

- Encontrar el circuito equivalente del transformador referido al lado de alta tensión.
- Hallar el circuito equivalente del transformador referido al lado de baja tensión.
- Calcular la regulación de tensión a plena carga para un f.d.p. 0,8 en retraso, para un f.d.p. 1,0, y para un f.d.p. 0,8 en adelanto.
- Dibujar la regulación de tensión desde vacío hasta plena carga si los f.d.p. son 0,8 en retraso, 1 y 0,8 en adelanto.
- ¿Cuál es la eficiencia del transformador a plena carga si el factor de potencia es 0,8 en retraso?



Eficiencia del transformador.

Ejemplo

a. Los valores de la rama de excitación del circuito equivalentes se pueden determinar como:

$$\theta_o = \cos^{-1} \frac{P_o}{V_o I_o} = \cos^{-1} \frac{50}{2300 \cdot 0,21} = 84^\circ$$

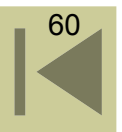
La admitancia de excitación es:

$$Y_E = \frac{I_o}{V_o} \angle -84^\circ = \frac{0,21}{2300} \angle -84^\circ = 0,000095 - j0,0000908 S$$

Los elementos de la rama de excitación referidos al lado de primario son:

$$R_c = \frac{1}{0,0000095} = 105 k\Omega$$

$$X_M = \frac{1}{0,0000908} = 11 k\Omega$$



Eficiencia del transformador.

Ejemplo

A partir de los datos de la prueba de cortocircuito, se obtiene el ángulo de la impedancia de cortocircuito:

$$\theta_{CC} = \cos^{-1} \frac{P_{CC}}{V_{CC} I_{CC}} = \cos^{-1} \frac{160}{47 \cdot 6} = 55,4^\circ$$

La impedancia serie equivalente valdrá:

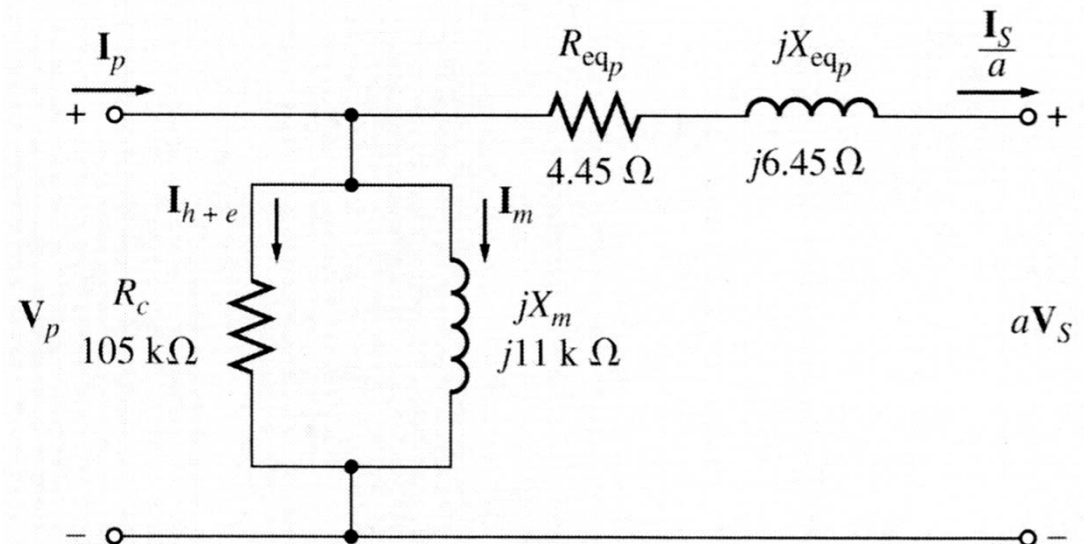
$$Z_{SE} = \frac{V_{SC}}{I_{CC}} \angle \theta_{CC} = \frac{47}{6} \angle 55,4^\circ = 4,45 + j6,45 \Omega$$

Los elementos serie referidos al primario son:

$$R_{eq} = 4,45 \Omega$$

$$X_{eq} = 6,45 \Omega$$

Circuito equivalente



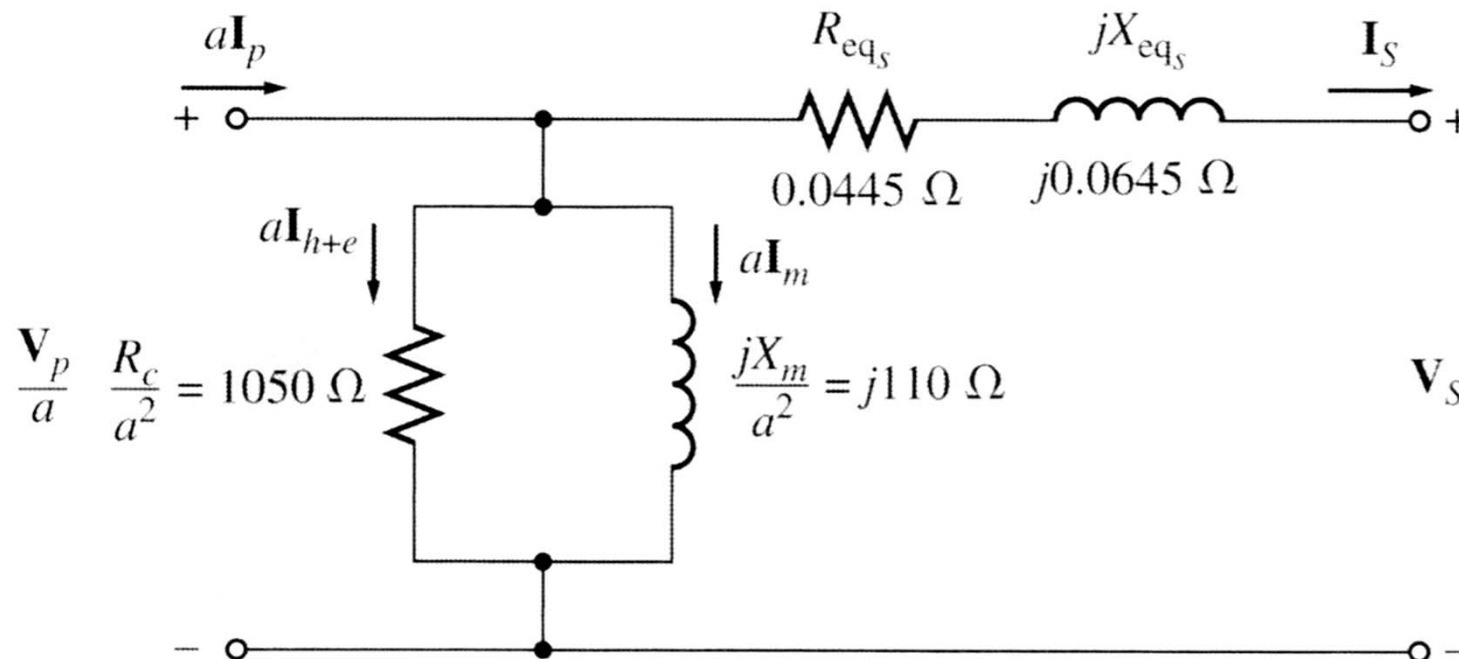
Eficiencia del transformador.

Ejemplo

b. Para hallar el circuito equivalente referido al lado de baja tensión, se necesita dividir la impedancia entre a^2 . Como $a = 10$, resulta:

$$R_{C_s} = 1050 \Omega \quad X_{M_s} = 110 \Omega \quad R_{eq_s} = 0,0445 \Omega \quad X_{eq_s} = 0,0645 \Omega$$

El circuito equivalente valdrá:



Eficiencia del transformador.

Ejemplo

c. La corriente a plena carga en el lado secundario del transformador vale:

$$I_{S, nominal} = \frac{S_{nominal}}{V_{S, nominal}} = \frac{15\,000}{230} = 65,2\text{ A}$$

Como:

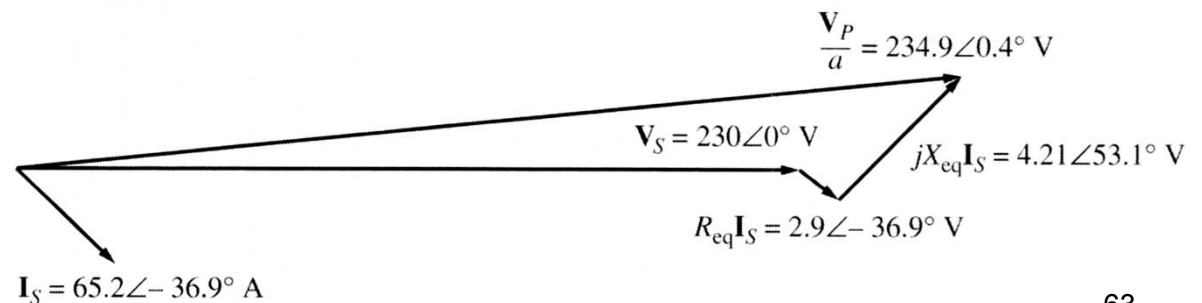
$$\frac{V_p}{a} = V_S + R_{eq} I_S + jX_{eq} I_S$$

Para un f.d.p. = 0,8 en retraso, la corriente $I_S = 65,2 \angle -\cos^{-1}(0,8) = 65,2 \angle -36,9^\circ\text{ A}$

y $\frac{V_p}{a} = 230 \angle 0^\circ + 0,0445 \cdot (65,2 \angle -36,9^\circ) + j0,0645 \cdot (65,2 \angle -36,9^\circ) = 234,85 \angle 0,40^\circ\text{ V}$

La regulación de tensión resultantes será, por tanto:

$$\begin{aligned} VR(\%) &= \frac{|V_p/a| - V_{S, plena_carga}}{V_{S, plena_carga}} \cdot 100 \\ &= \frac{234,85 - 230}{230} \cdot 100 \\ &= 2,1\% \end{aligned}$$



Eficiencia del transformador.

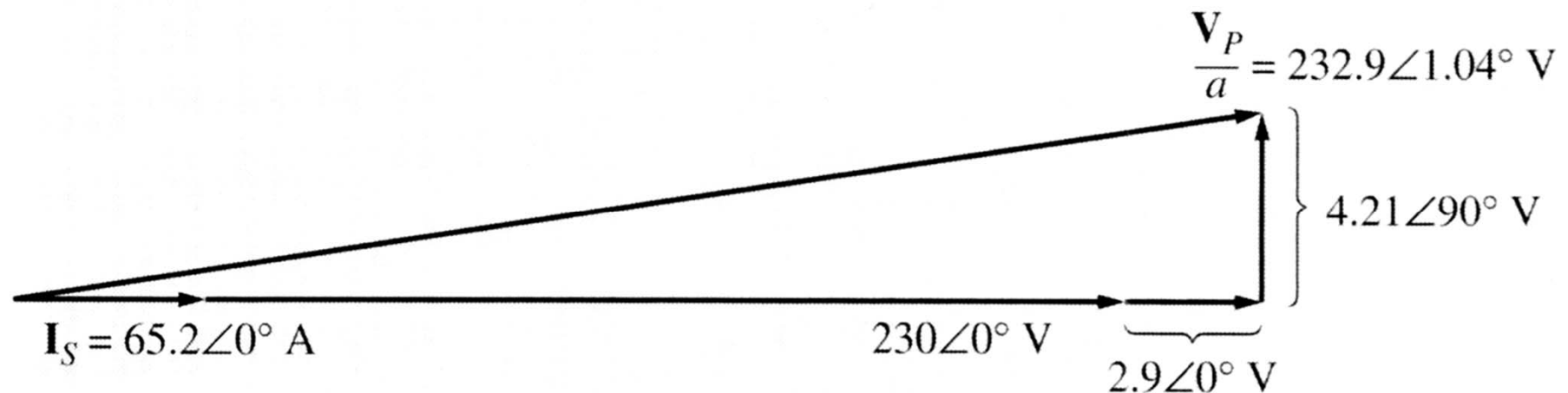
Ejemplo

Para un f.d.p. = 1.0, la corriente $I_s = 65,2 \angle \cos^{-1}(1,0) = 65,2 \angle 0^\circ \text{ A}$

$$\text{y } \frac{V_p}{a} = 230 \angle 0^\circ + 0,0445 \cdot (65,2 \angle 0^\circ) + j0,0645 \cdot (65,2 \angle 0^\circ) = 232,94 \angle 1,04^\circ \text{ V}$$

La regulación de tensión resultantes será, por tanto:

$$VR(\%) = \frac{|V_p/a| - V_{S,plena_carga}}{V_{S,plena_carga}} \cdot 100 = \frac{232,94 - 230}{230} \cdot 100 = 1,28\%$$



Eficiencia del transformador.

Ejemplo

Para un f.d.p. = 0.8 en adelanto, la corriente $I_s = 65,2 \angle \cos^{-1}(0,8) = 65,2 \angle 36,9^\circ \text{ A}$

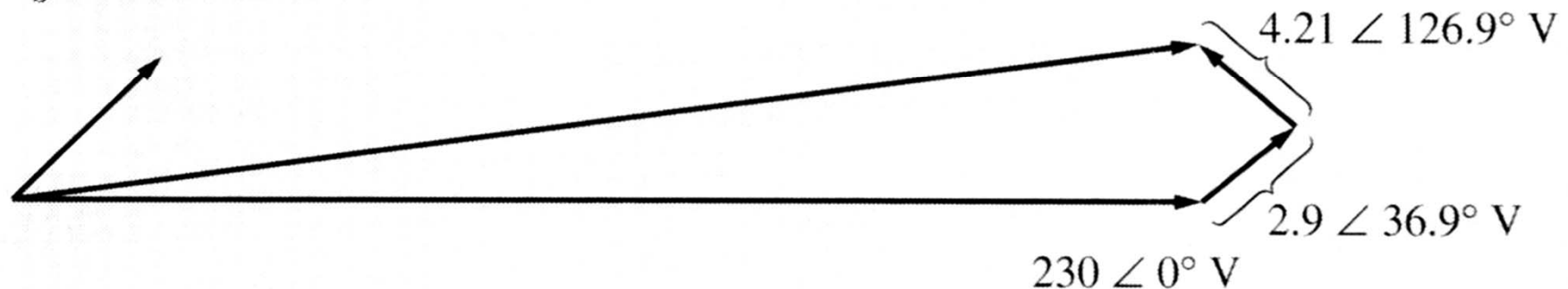
$$\text{y } \frac{V_p}{a} = 230 \angle 0^\circ + 0,0445 \cdot (65,2 \angle 36,9^\circ) + j0,0645 \cdot (65,2 \angle 36,9^\circ) = 229,85 \angle 1,27^\circ \text{ V}$$

La regulación de tensión resultantes será, por tanto:

$$VR(\%) = \frac{|V_p/a| - V_{S,plena_carga}}{V_{S,plena_carga}} \cdot 100 = \frac{229,85 - 230}{230} \cdot 100 = -0,062\%$$

$$\frac{V_p}{a} = 229,8 \angle 1,27^\circ \text{ V}$$

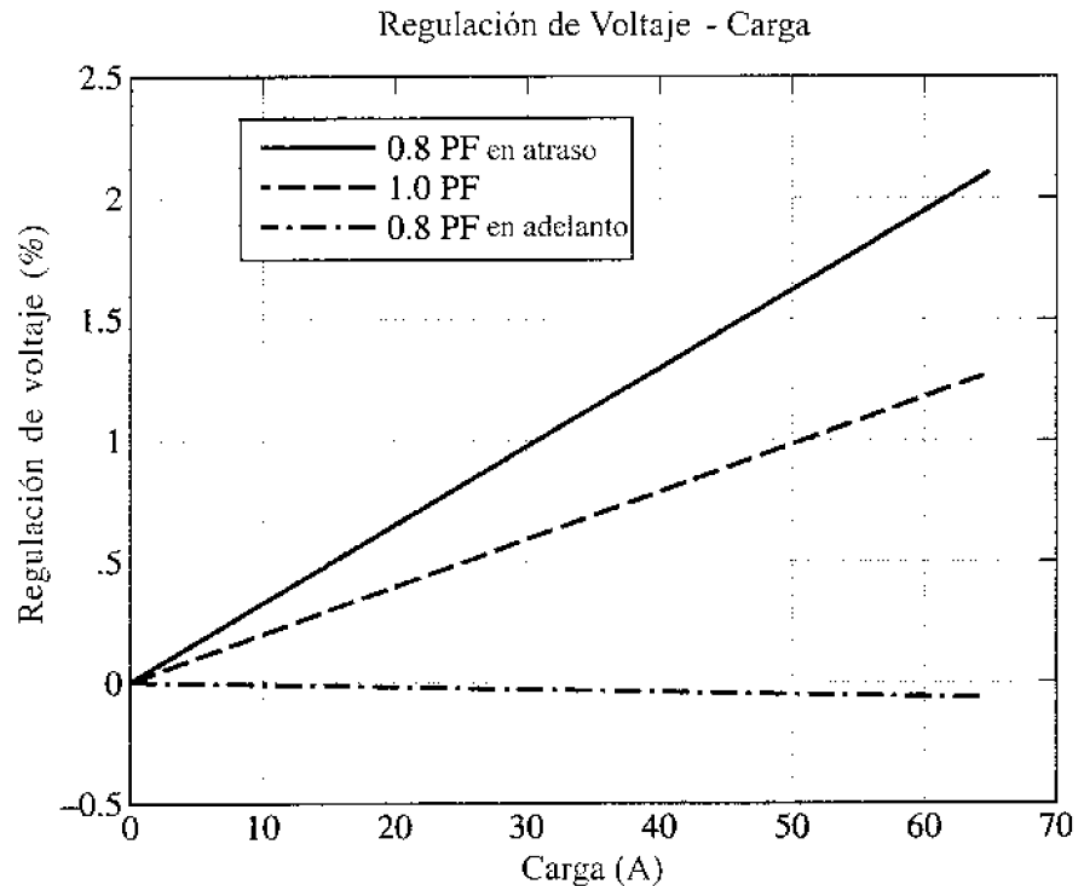
$$I_s = 65,2 \angle 36,9^\circ \text{ A}$$



Eficiencia del transformador.

Ejemplo

Si representamos **cómo varía la regulación de tensión en función de diferentes niveles de carga y para los tres factores de potencia considerados**, obtendremos la siguiente gráfica.



Eficiencia del transformador.

Ejemplo

e. Para hallar la eficiencia del transformador, primero se calculan las pérdidas.
Las pérdidas en el cobre son:

$$P_{Cu} = I_S^2 R_{eq} = 65,2^2 \cdot 0,0445 = 189 \text{ W}$$

Las pérdidas en el núcleo están dadas por:

$$P_{nucleo} = \frac{(V_p/a)^2}{R_{Cs}} = \frac{234,85^2}{1050} = 52,5 \text{ W}$$

La potencia de salida con este factor de potencia es:

$$P_{salida} = V_S I_S \cos \theta = 230 \cdot 65,2 \cdot \cos 36,9^\circ = 12\,000 \text{ W}$$

Por tanto, la eficiencia del transformador es:

$$\eta(\%) = \frac{P_{salida}}{P_{Cu} + P_{nucleo} + P_{salida}} \cdot 100 = 98,03\%$$

Valores nominales de los transformadores

Los principales valores nominales de los transformadores son:

1. Potencia aparente
2. Tensión
3. Corriente
4. Frecuencia

Valores nominales del transformador: tensión y frecuencia

El valor nominal **tensión**: a) se utiliza para evitar la perforación del aislamiento de los devanados en caso de aplicación de una tensión excesiva; b) está relacionado con la corriente de magnetización del transformador (función más importante)

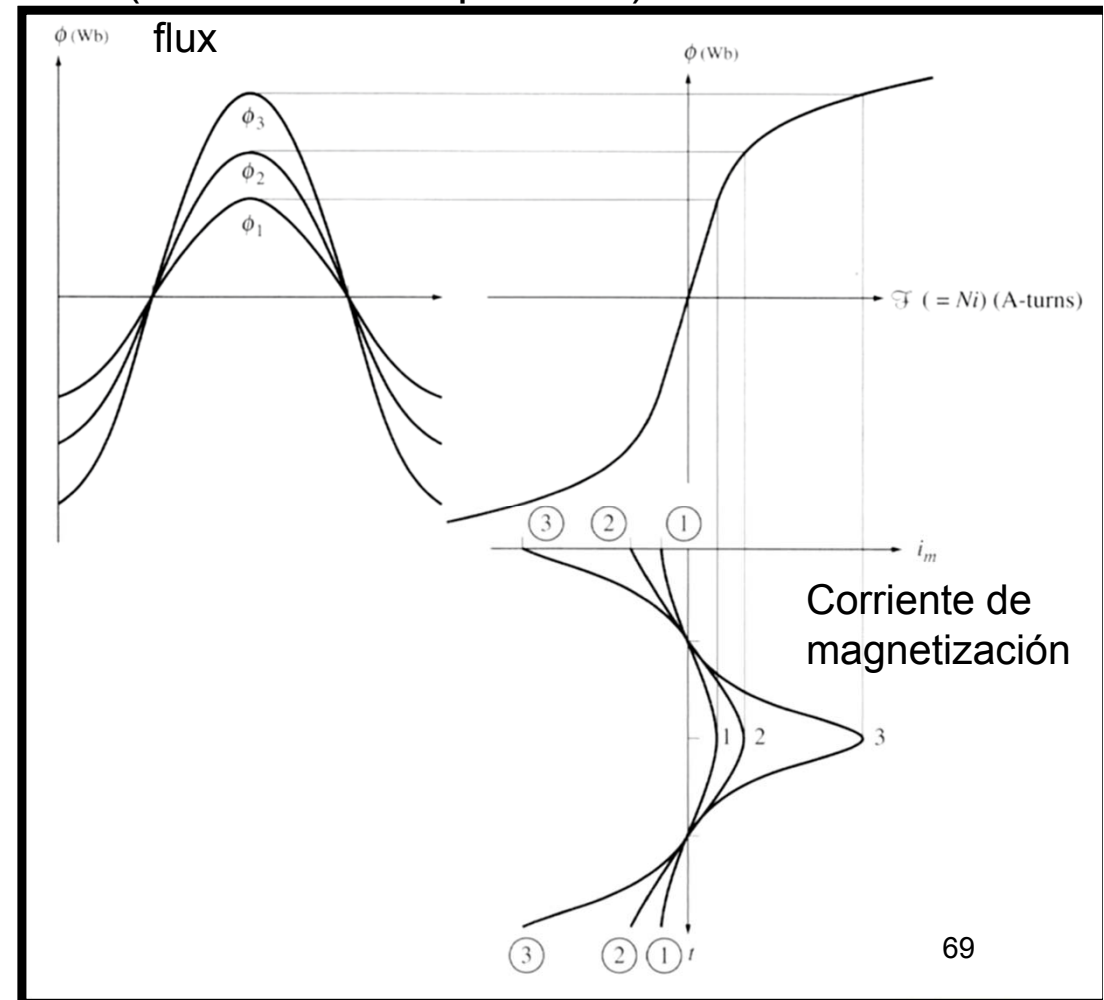
Si una tensión en régimen permanente de valor:

$$v(t) = V_M \sin \omega t$$

Se aplica al devanado de primario del transformador, el flujo por el transformador será:

$$\phi(t) = \frac{1}{N_p} \int v(t) dt = -\frac{V_M}{\omega N_p} \cos \omega t$$

Un incremento en la tensión llevará a un incremento proporcional en el flujo. Sin embargo, **por encima de cierto punto** (en la región de saturación), **el incremento en flujo requerirá un incremento inaceptable en la corriente de magnetización.**



Valores nominales del transformador: tensión y frecuencia

En consecuencia, **la tensión aplicada máxima, y por tanto el valor nominal, queda fijada por la máxima corriente de magnetización aceptable en el núcleo.**

Es fácil ver que **el flujo máximo se relaciona, también, con la frecuencia:**

$$\phi_{\max} = \frac{V_{\max}}{\omega N_p} = \frac{V \cdot \sqrt{2}}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot N_p}$$

Por tanto, para mantener el mismo flujo máximo, un cambio en la frecuencia (p.e., 50 Hz en lugar de 60 Hz) se debe acompañar por la correspondiente corrección en la tensión máxima permitida.

Ejemplo: un transformador a 50 Hz puede operar a una tensión un 20% más elevada si la frecuencia de alimentación es de 60 Hz, siempre que ello no cause daños por aislamiento en el transformador.

Valores nominales del transformador: tensión y frecuencia

Como las tensiones y f.e.m.s. en un transformador van adelantadas 90° respecto al flujo, **una expresión muy utilizada para relacionar el valor eficaz de la tensión en el primario o secundario en función del flujo máximo** por el transformador es la que a continuación se relaciona:

$$V_p = \frac{N_p \cdot \omega \cdot \phi_{\max}}{\sqrt{2}} = \frac{N_p \cdot 2 \cdot \pi \cdot f \cdot \phi_{\max}}{\sqrt{2}} = 4,44 \cdot f \cdot N_p \cdot \phi_{\max} = E_1$$

$$V_s = \frac{N_s \cdot \omega \cdot \phi_{\max}}{\sqrt{2}} = \frac{N_s \cdot 2 \cdot \pi \cdot f \cdot \phi_{\max}}{\sqrt{2}} = 4,44 \cdot f \cdot N_s \cdot \phi_{\max} = E_2$$

Valores nominales del transformador: potencia aparente

El valor nominal de la potencia aparente determina, junto con el valor nominal de la tensión, la corriente a través de los devanados. La corriente determina las pérdidas i^2R y, por tanto, el calentamiento de las bobinas. El sobrecalentamiento acorta drásticamente la vida del aislamiento del transformador.

Además del valor nominal de potencia aparente propio del transformador, se pueden especificar otros valores nominales adicionales más altos para éste, en caso de utilizarse un sistema de enfriamiento con ventilación forzada. En cualquier circunstancia, la temperatura de los devanados debe ser limitada para proteger la vida de los mismos.

Si la tensión de un transformador se reduce (p.e. si el transformador trabaja a menor frecuencia), el valor nominal de la potencia aparente debe reducirse en igual cantidad para mantener constante la corriente.

Valores nominales del transformador: placa de características

La tensión, corrientes y/o potencia nominales es una información que el fabricante aporta en la placa de características del transformador.

Placa de características transformador de distribución

OASA TRANSFORMADORES		SAN SEBASTIAN			
TRANSFORMADOR TRIFASICO 50 Hz REFRIGERACION NATURAL					
TIPO		630 / 25-20			
NORMA UNE	21428	POTENCIA ASIGNADA	630 kVA		
AÑO FABRICACION	2000	Nº FABRICACION	37284		
SIMBOLO DE ACOPLAMIENTO	Dyn11	ALTA TENSION			
IMPEDANCIA CC A 75 °C (%)	4,73	POS. CONM. 1	POS. CONM. 2		
NIVEL DE POTENC. ACUSTICA dB(A)	67	1	1		
MATERIAL AT/BT	Cu/Cu	2		14,55	
VOLUMEN (l) AISLANTE A 20°C	584	3			
MASA A DESENCUBAR (kg)	1.940	4			
MASA TOTAL (kg)	2.810	5			
		1	2		
		2		18,19	
		3			
		4			
		5			
		BAJA TENSION			
		LINEA EN:	TENSION (V)	CORRIENTE (A)	POTENCIA kVA
		2U-2V-2W	420/n	866	630
		3U-3V-3W	242/n	1128	473
NIVEL AISLAMIENTO		AT	IR 170 FI 70		
		BT	IR 20 FI 10		
LIQUIDO AISLANTE		ACEITE			

La placa incluye, también, información como: impedancia serie en p.u, tipo de refrigerante, esquema cableado, número de tomas, etc.

Índice de carga del transformador

Se define índice de carga C al cociente entre la corriente secundaria del transformador y la asignada correspondiente, es decir:

$$C = \frac{I_s}{I_{sN}} = \frac{I'_s}{I'_{sN}} = \frac{\frac{I_s}{a}}{\frac{I_{sN}}{a}} \approx \frac{I_p}{I_{pN}}$$

Este número nos indica también el grado de sollicitación al que sometemos al transformador puesto que es la relación entre la potencia de consumo y la nominal.

Si decimos que el índice de carga es igual a 1, es porque el transformador trabaja a plena carga, mientras que a media carga $C=1/2$.

Índice de carga del transformador

El rendimiento será máximo para una determinada carga para la cual *coinciden* las pérdidas fijas y variables. Ambas pérdidas se obtienen de los ensayos realizados al transformador.

- ❖ Pérdidas fijas: pérdidas mecánicas, pérdidas en el hierro, P_{Fe} .
- ❖ Pérdidas variables: pérdidas que cambian según el régimen de carga, son pérdidas en el cobre, P_{Cu} .

El **índice de carga óptimo** al cual se obtiene el rendimiento máximo viene dado por:

$$C_{opt} = \sqrt{\frac{P_{fijas}}{P_{variables \text{ a la potencia nominal}}}}$$

Índice de carga del transformador

✓ Si el transformador trabajara siempre a plena carga convendría que el índice anterior fuera igual a la unidad, de este modo la máquina trabajaría con máximo rendimiento; sin embargo, lo normal es que un transformador trabaje con pérdidas variables, y esto hace que en la práctica se diseñen estas máquinas con un índice de carga comprendido entre **0,5 y 0,7** para los **grandes transformadores** de las centrales eléctricas y entre **0,3 y 0,5** para los transformadores de distribución de **pequeña potencia**.

✓ Podemos definir el rendimiento como:

$$\eta = \frac{C \cdot V_{s_n} \cdot I_{s_n} \cdot \cos \varphi}{C \cdot V_{s_n} \cdot I_{s_n} \cdot \cos \varphi + P_{Fe} + C^2 \cdot P_{Cu \text{ plena carga}}} = \frac{C \cdot S_n \cdot \cos \varphi}{C \cdot S_n \cdot \cos \varphi + P_{fijas} + P_{variables}}$$

Índice de carga del transformador

Ejemplo 6: Se dispone de un transformador monofásico de 250 kVA, 15.000/250 V, 50 Hz, que tiene unas pérdidas en el hierro de 4.000 W y unas pérdidas en el cobre a plena carga de 5.000 W.

Calcular:

- a) Rendimiento a plena carga con f.d.p. 0,8.
- b) Rendimiento a media carga con f.d.p. unidad
- c) Potencia de máximo rendimiento
- d) Rendimiento máximo para f.d.p. 0,9.

Solución:

a) De los datos anteriores se deduce:

$$P_0 = P_{FE} = 4 \text{ kW}$$

$$P_{CU} = P_{CC} = 5 \text{ kW}$$

A plena carga, el índice C es igual a 1, y el rendimiento del transformador vale:

$$\eta(\%) = \frac{250 \cdot 0,8}{250 \cdot 0,8 + 4 + 5} \cdot 100 = 95,7\%$$

Índice de carga del transformador

b) A media carga ($C=1/2$) se tendrá:

$$\eta(\%) = \frac{\left(\frac{1}{2}\right) \cdot 250 \cdot 1}{\left(\frac{1}{2}\right) \cdot 250 \cdot 1 + 4 + \left(\frac{1}{2}\right)^2 \cdot 5} \cdot 100 = 95,9\%$$

Se observa que el rendimiento en este caso es mayor que en el caso anterior debido a que ahora trabaja la máquina con mejor f.d.p., pese a que el transformador funciona a media carga.

c) El índice de carga para el que se obtiene rendimiento máximo es:

$$C_{opt} = \sqrt{\frac{P_0}{P_{cc}}} \sqrt{\frac{4}{5}} = 0,894 \quad S_{\eta_{\max}} = 0,894 \cdot 250 = 223,6 \text{ kVA}$$

Índice de carga del transformador

d) El rendimiento máximo será entonces igual a:

$$\eta = \frac{0,894 \cdot 250 \cdot 0,9}{0,894 \cdot 250 \cdot 0,9 + 4 + 0,894^2 \cdot 5} = 96,2\%$$

Tomas de regulación (taps) y regulación de tensión en los transformadores

Hasta ahora se ha supuesto que la relación de transformación es fija (constante) para un transformador dado. **Con frecuencia, los transformadores de distribución poseen una serie de tomas (taps) en los devanados para permitir pequeños cambios en la relación de vueltas del transformador después de haber salido de fábrica.** Un transformador típico podría tener 4 tomas además del valor nominal, con intervalos entre éstas del 2.5 % de la tensión a plena carga. En consecuencia, es posible realizar ajustes hasta del $\pm 5\%$ de la tensión nominal en un transformador.

Ejemplo 4: Un transformador de distribución de 500 kVA, 13 200/480 V tiene 4 tomas de 2.5 % sobre su devanado primario. ¿Cuáles son las relaciones de tensión del transformador en cada toma?

+ 5.0% tap	13 860/480 V
+ 2.5% tap	13 530/480 V
Valor nominal	13 200/480 V
- 2.5% tap	12 870/480 V
- 5.0% tap	12 540/480 V



Tomas de regulación (taps) y regulación de tensión en los transformadores

Las tomas de un trafo. permiten que éste pueda ajustarse para acomodarse a las variaciones de tensiones que de forma local puedan producirse.

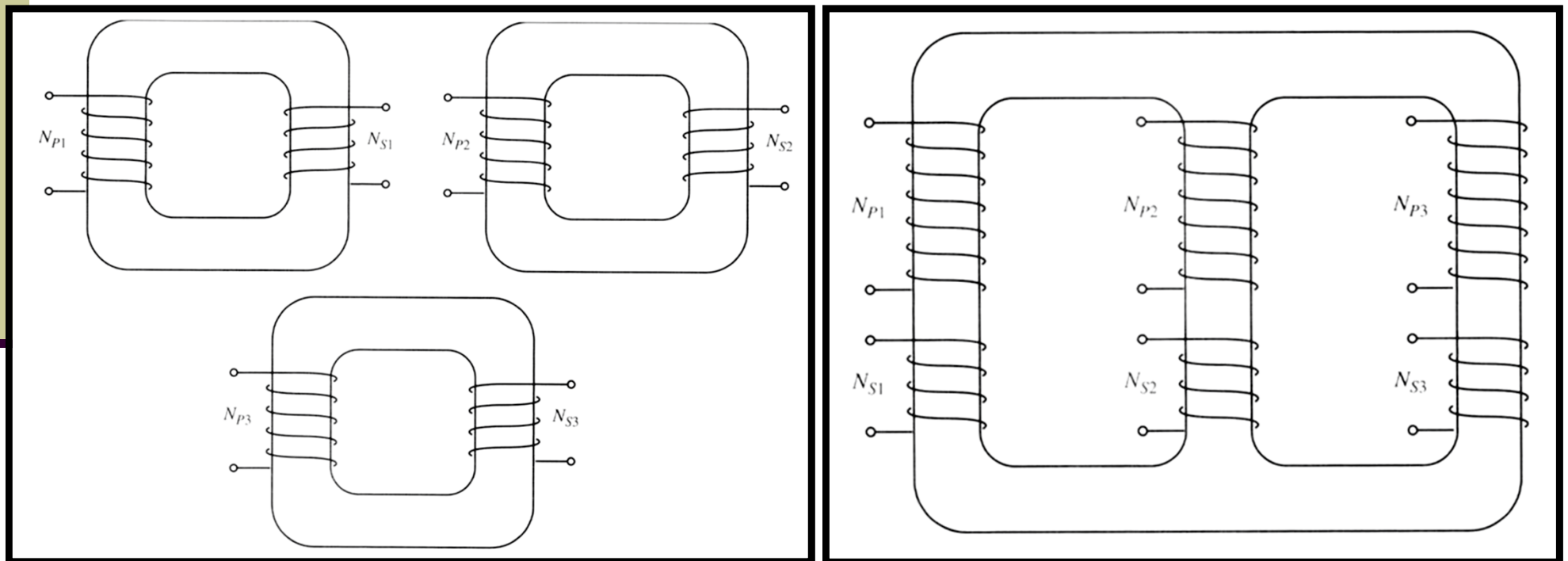
A veces los transformadores se usan en una línea de potencia cuya tensión varía ampliamente con la carga. Tales variaciones pueden producirse por una alta impedancia de línea. Las cargas (receptores) precisan de suministros de tensión constante

Problema: ¿Cómo puede una cia. eléctrica entregar una tensión controlada haciendo uso de líneas de alta impedancia que alimentan a cargas que cambian constantemente?

Una posible solución a este problema es utilizar un transformador especial llamado **transformador conmutador de tomas bajo carga (TCUL) o un regulador de tensión. Un transformador TCUL es aquel que tiene posibilidad de cambiar las tomas mientras se está suministrando potencia. Un regulador de tensión es un transformador TCUL con un circuito sensor de tensión incorporado que cambia automáticamente las tomas para mantener constante la tensión del sistema.** Estos transformadores de “auto-ajuste” son muy comunes en los sistemas de potencia actuales.

Transformadores trifásicos

La mayoría de los sistemas de generación/distribución de potencia que existen en el mundo son sistemas trifásicos. Los transformadores para tales circuitos se suelen construir, bien como un banco trifásico compuesto de tres trafos. monofásicos, o como tres conjuntos de devanados enrollados sobre un núcleo común (disposición más ligera, barata y eficiente).



Conexiones de los transformadores trifásicos

La clave para analizar un banco trifásico consiste en analizar el comportamiento por separado de cada transformador que compone el banco: *cada transformador monofásico del banco se comporta exactamente como los transformadores monofásicos ya estudiados.*

La impedancia, regulación de tensión, eficiencia y demás cálculos para los transformadores trifásicos se harán sobre una base por fase, utilizando las mismas técnicas de los transformadores monofásicos.

Las cuatro conexiones posibles para un banco de transformadores trifásico son:

1. Y-Y
2. Y- Δ
3. Δ - Δ
4. Δ -Y

Conexiones de los transformadores trifásicos

1. Conexión Y-Y:

La tensión en el primario de cada fase del transformador es:

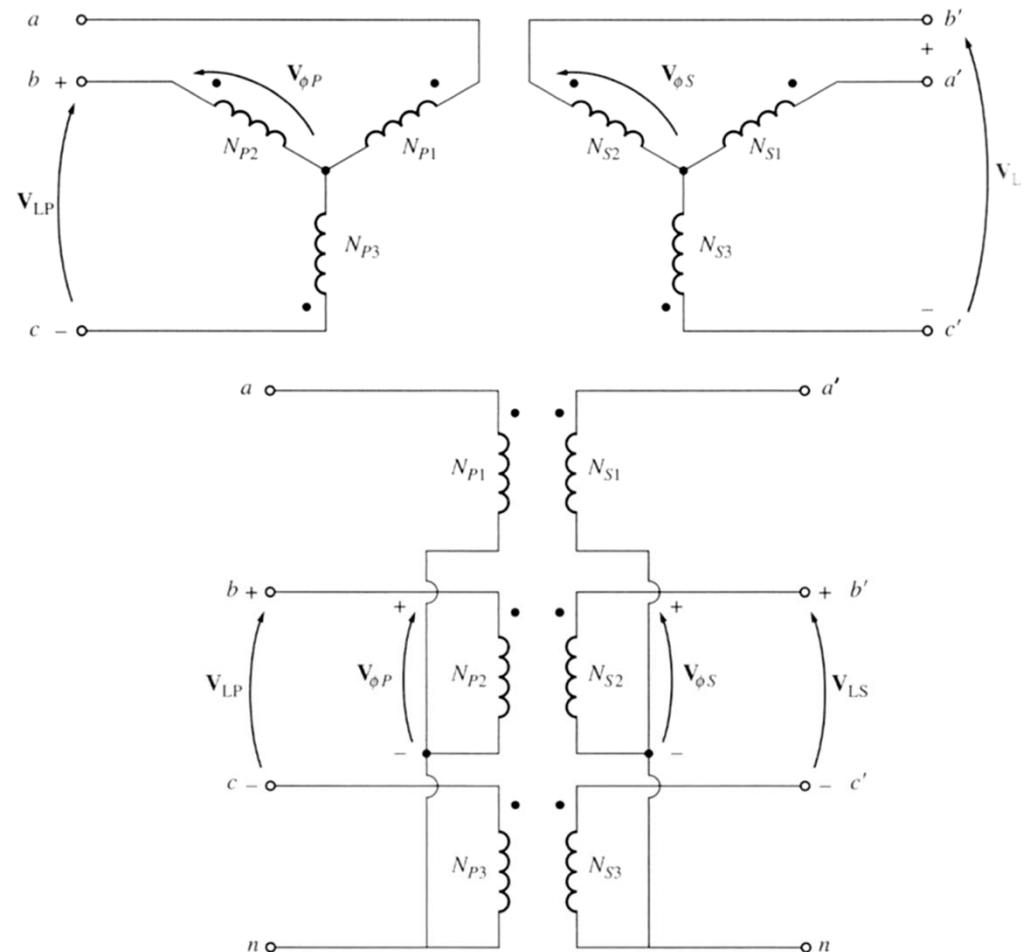
$$V_{\phi P} = \frac{V_{LP}}{\sqrt{3}}$$

La tensión de línea del secundario es:

$$V_{LS} = \sqrt{3}V_{\phi S}$$

La relación de transformación vale:

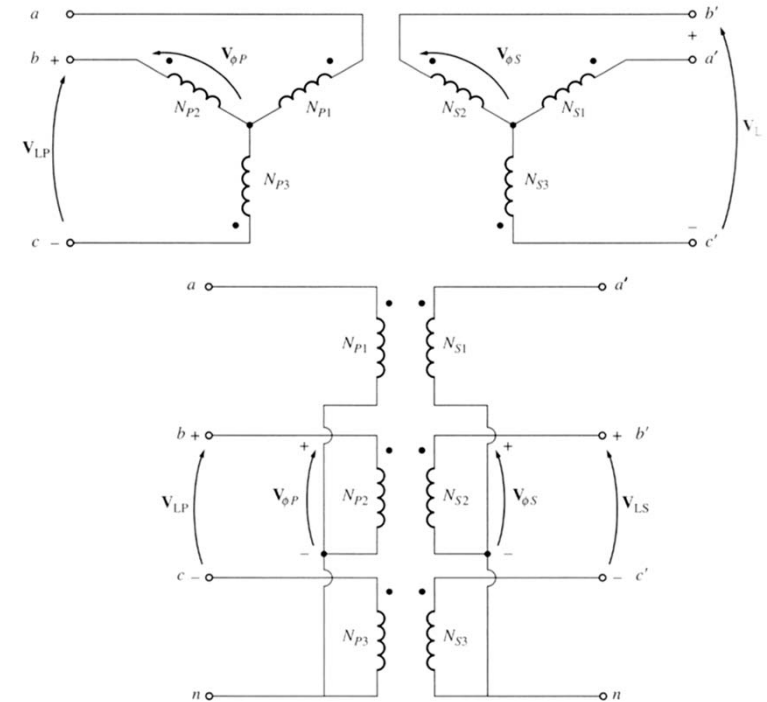
$$\frac{V_{LP}}{V_{LS}} = \frac{\sqrt{3}V_{\phi P}}{\sqrt{3}V_{\phi S}} = a$$



Conexiones de los transformadores trifásicos

La conexión Y-Y presenta dos problemas graves:

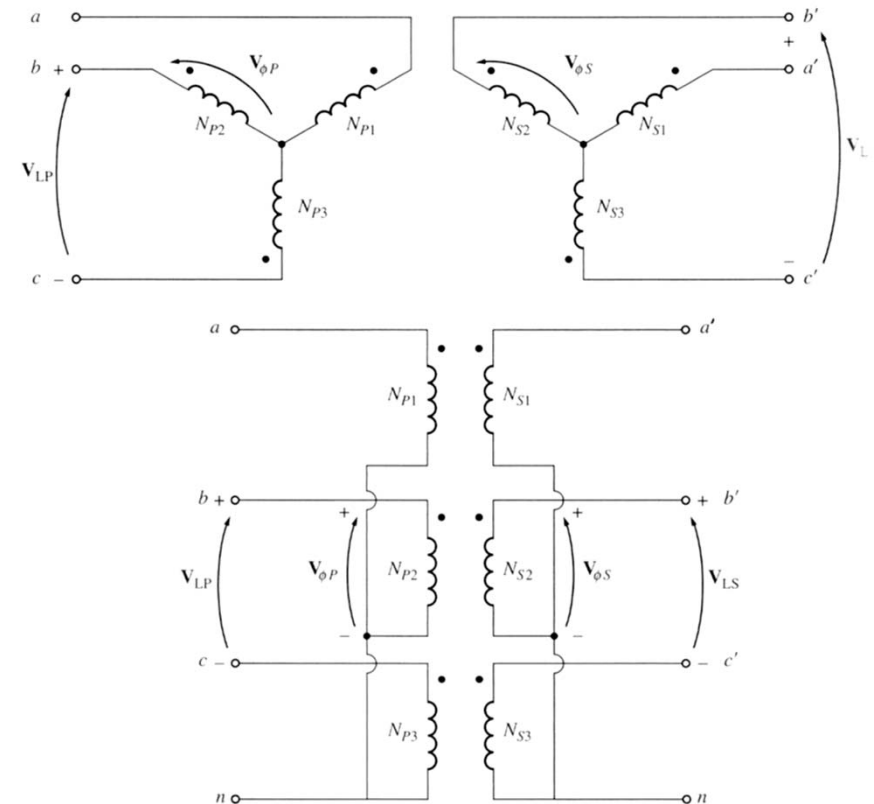
1. Si las **cargas** en uno de los circuitos del transformador **no** están **equilibradas**, las tensiones de las fases del transformador pueden llegar a desequilibrarse severamente.
2. El **problema del armónico de orden 3**. Las tensiones en cualquier fase de un transformador Y-Y desfasan entre sí 120° eléctricos. Sin embargo, las componentes del tercer armónico de cada una de las tres fases estarán en fase entre sí. **La no linealidad en el núcleo del transformador siempre llevará a la generación del tercer armónico**. Estas componentes se sumarán dando lugar a una componente de tensión del tercer armónico bastante grande (puede ser incluso mayor que la componente fundamental de la tensión).



Conexiones de los transformadores trifásicos

Ambos problemas, el desequilibrio de tensiones y el de los armónicos de orden 3, **pueden resolverse utilizando una de las dos técnicas siguientes:**

1. Colocando rígidamente a tierra los neutros de los transformadores, en especial el neutro de los devanados primarios.
2. Añadiendo un tercer devanado conectado en Δ al banco de transformadores.



Conexiones de los transformadores trifásicos

2. Conexión Y-Δ:

La tensión primaria de cada fase del transformador es

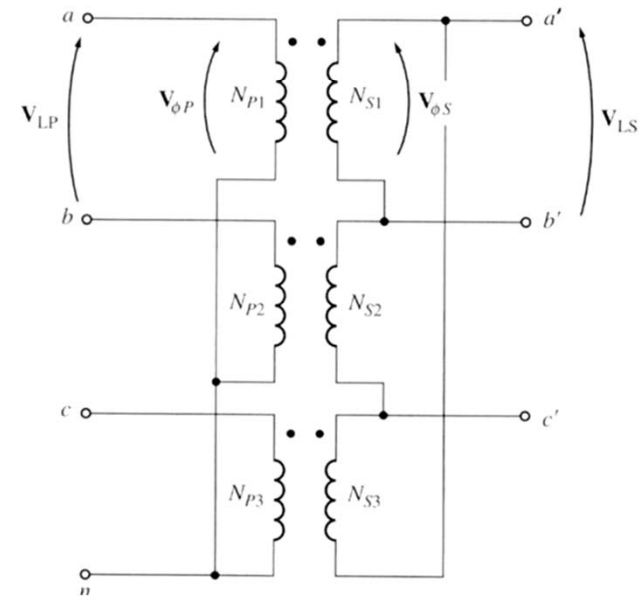
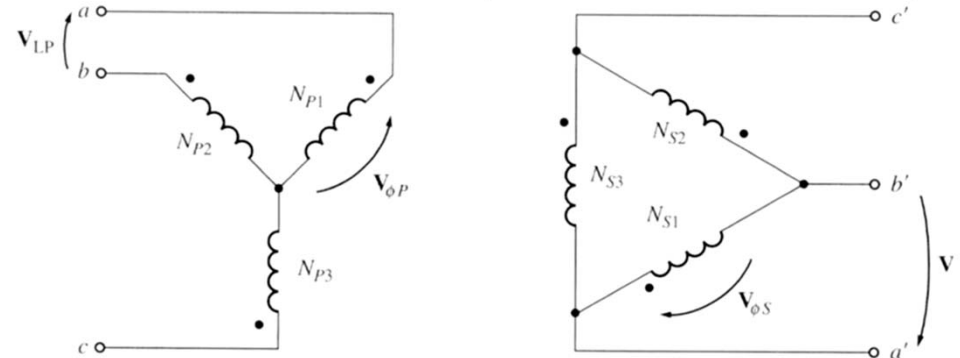
$$V_{\phi P} = \frac{V_{LP}}{\sqrt{3}}$$

La tensión de línea de secundario es:

$$V_{LS} = V_{\phi S}$$

La relación total entre la tensión de línea del primario y la tensión de línea del secundario es:

$$\frac{V_{LP}}{V_{LS}} = \frac{\sqrt{3}V_{\phi P}}{V_{\phi S}} = \sqrt{3}a$$

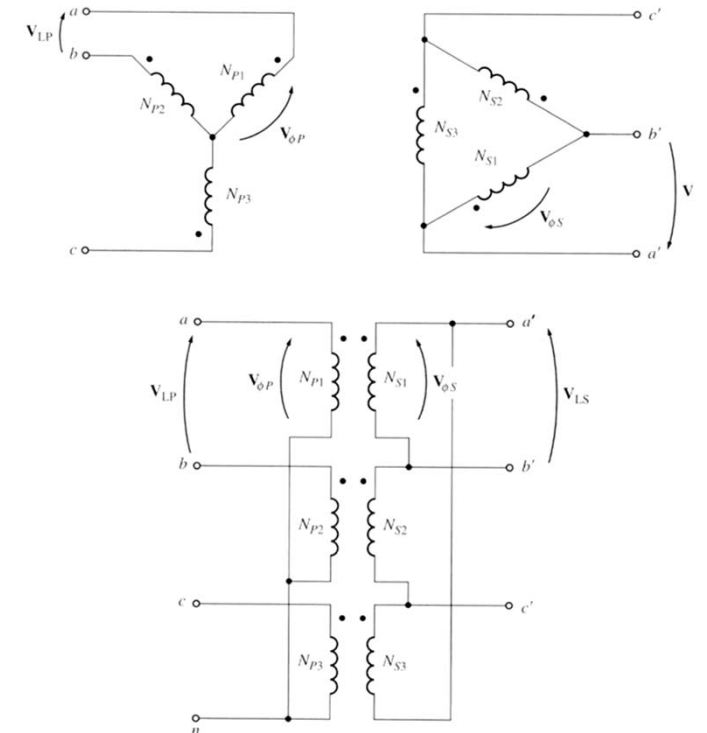


Conexiones de los transformadores trifásicos

La conexión Y- Δ **no tiene problemas con las componentes del tercer armónico**, ya que éstas son absorbidas por medio de una corriente circulante en el Δ . Esta conexión es, también, más estable cuando hay presencia de cargas desequilibradas puesto que el Δ redistribuye parcialmente cualquier desequilibrio que ocurra.

Un problema asociado con esta conexión es que la tensión del secundario está desfasada 30° con respecto a la tensión de primario del transformador. Esto causa problemas en la puesta en paralelo de dos bancos de transformadores, ya que las tensiones del secundario de ambos transformadores deben estar en fase para poder acoplarse en paralelo.

En la conexión Y- Δ mostrada en la figura, la tensión del secundario retrasa 30° con respecto a la tensión del primario cuando la secuencia es directa.



Conexiones de los transformadores trifásicos

3. Conexión Δ -Y:

La tensión primaria de cada fase del transformador es:

$$V_{\phi P} = V_{LP}$$

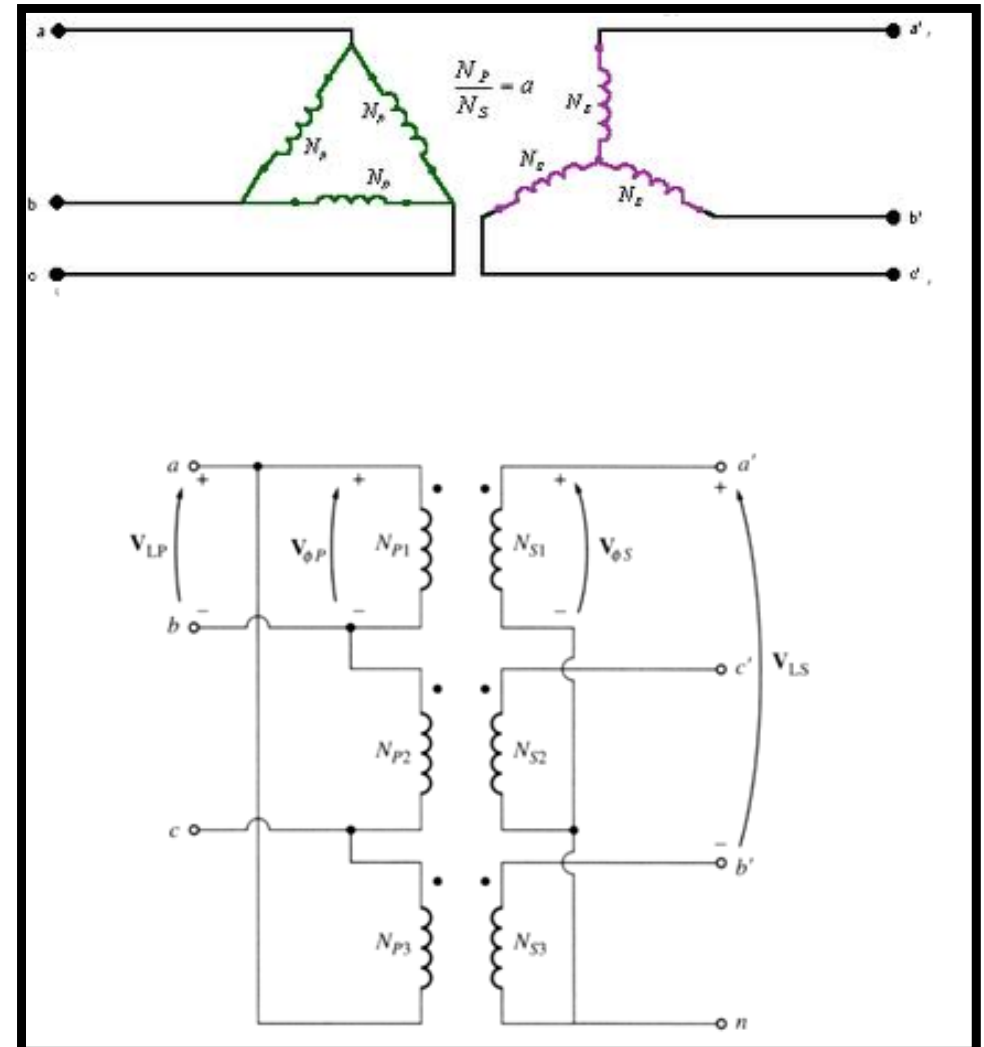
La tensión de línea del secundario es:

$$V_{LS} = \sqrt{3}V_{\phi S}$$

La relación total entre la tensión de línea del primario y la tensión de línea del secundario es:

$$\frac{V_{LP}}{V_{LS}} = \frac{V_{\phi P}}{\sqrt{3}V_{\phi S}} = \frac{a}{\sqrt{3}}$$

Posee las mismas ventajas e igual desfasaje que la conexión Y- Δ .



Conexiones de los transformadores trifásicos

4. Conexión $\Delta - \Delta$:

La tensión de primario de cada fase del transformador es:

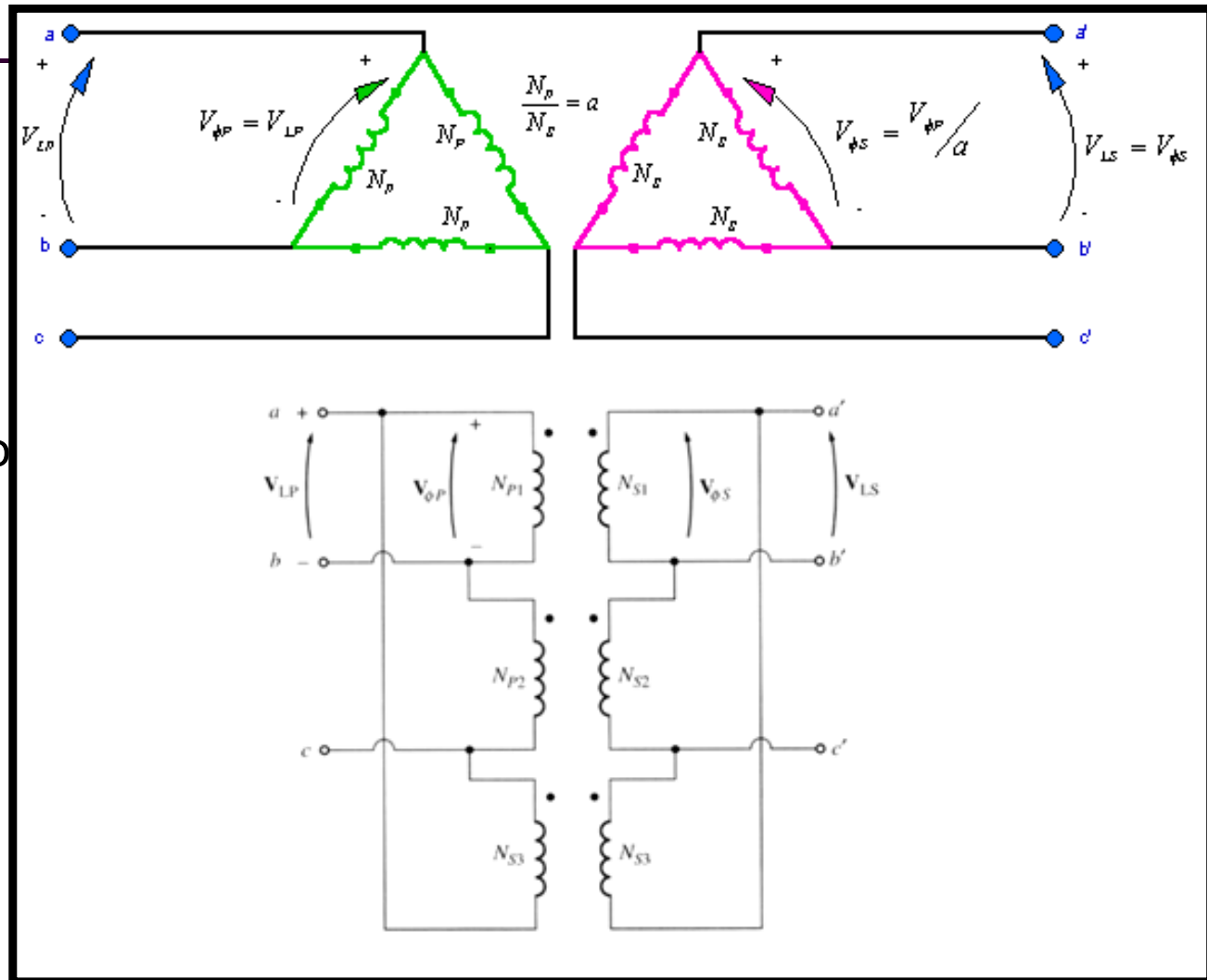
$$V_{\phi P} = V_{LP}$$

La tensión de línea del secundario es:

$$V_{LS} = V_{\phi S}$$

La relación total entre la tensión de línea del primario y la tensión de línea del secundario es:

$$\frac{V_{LP}}{V_{LS}} = \frac{V_{\phi P}}{V_{\phi S}} = a$$



No existe desfase, ni problemas asociados con cargas desequilibradas o componentes armónicas.

Vídeos resumen

- Vídeos relacionados con transformador:
- <http://ingenieriaelectricaexplicada.blogspot.com.es/2009/11/video-animacion-del-montaje-de-un.html>
- Vídeo realización de un transformador, “Build a Transformer”:
- http://www.youtube.com/watch?v=5MGOsnq_6Eo&feature=related

