

Clases 11 y 12 – TIM 71

Máquinas eléctricas

Tecnólogo Industrial Mecánico

7 y 9 de abril de 2025

Tema 2: Transformadores

- **Objetivo general:**

- Comprender el funcionamiento, modelado y aplicaciones de los transformadores en sistemas de potencia. Y aplicaciones industriales

- **Temario:**

1. Aplicaciones de los transformadores
2. Propósito del transformador en sistemas de potencia.
3. Relaciones en un transformador ideal.
4. Análisis de circuitos con trafos. Ideales (nuevo)
5. Transformadores reales vs. ideales.
6. Modelado de pérdidas y efectos no ideales.
7. Circuito equivalente del transformador.
8. Deducción del circuito equivalente a partir de mediciones.
9. Valores nominales de un trafa
10. Sistema de mediciones por unidad.
11. Capacidades nominales.
12. Caída (regulación) de voltaje.
13. Pérdidas y eficiencia.
- ~~14. Autotransformadores. (se quita del teórico 2025)~~
- 15. Transformadores trifásicos.**
- 16. Índice horario y trafos. en paralelo**
17. Principios constructivos de los trafos. de potencia

Obs: Ajustes leves en el temario

$$F = G \frac{m_1 m_2}{d^2}$$

$$i\hbar \frac{\partial}{\partial t} \psi = \hat{H} \psi$$

$$\phi(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma}} e^{-\frac{x^2}{2\sigma^2}}$$

$$E = mc^2$$

$$\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = c^2 \frac{\partial^2 u}{\partial x^2}$$

$$\frac{df}{dt}$$

Clase 11

1. Repaso de sistemas trifasicos
2. Construcción del trafo trifásico
3. Tipos de conexiones

Repaso: Sistemas trifásicos

- Se repasa en clase el tema en base al Anexo del Chapman.

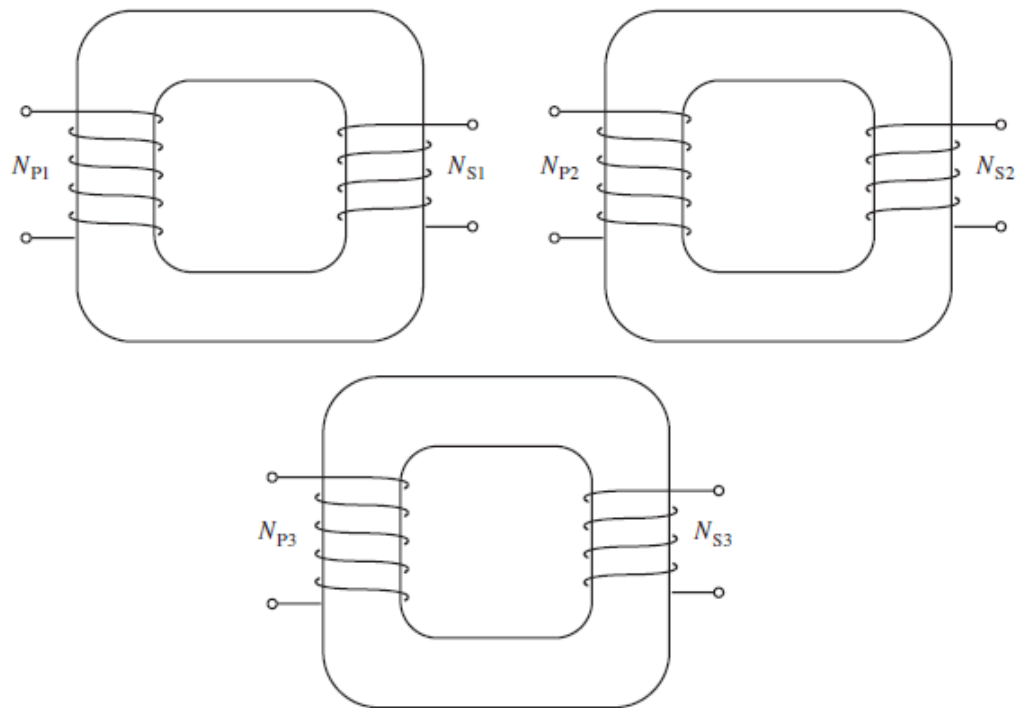
Transformadores en Sistemas Trifásicos

1. Importancia en Sistemas de Potencia:

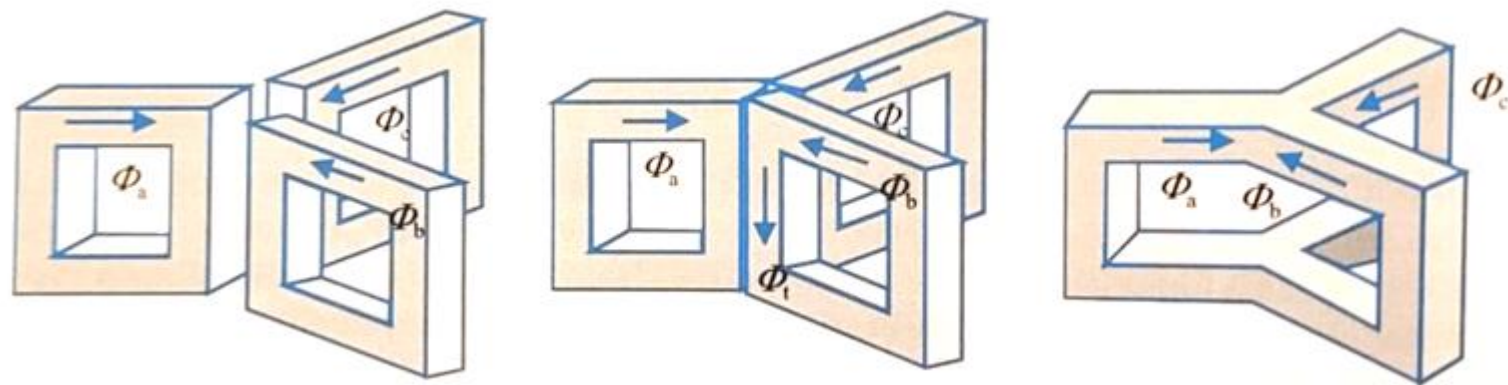
- Sistemas trifásicos dominan la generación y distribución mundial.
- Transformadores son componentes clave en estas redes.

2. Tipos de Construcción:

- **Banco trifásico:** 3 transformadores monofásicos interconectados.
 - *Ventaja:* Reemplazo individual de unidades.
- **Transformador trifásico integrado:** 3 devanados en núcleo común.
 - *Ventajas:* Más compacto, económico y eficiente.



Banco trifásico de transformador compuesto por tres transformadores independientes.



Génesis del trafo trifásico a partir del trafo monofásico

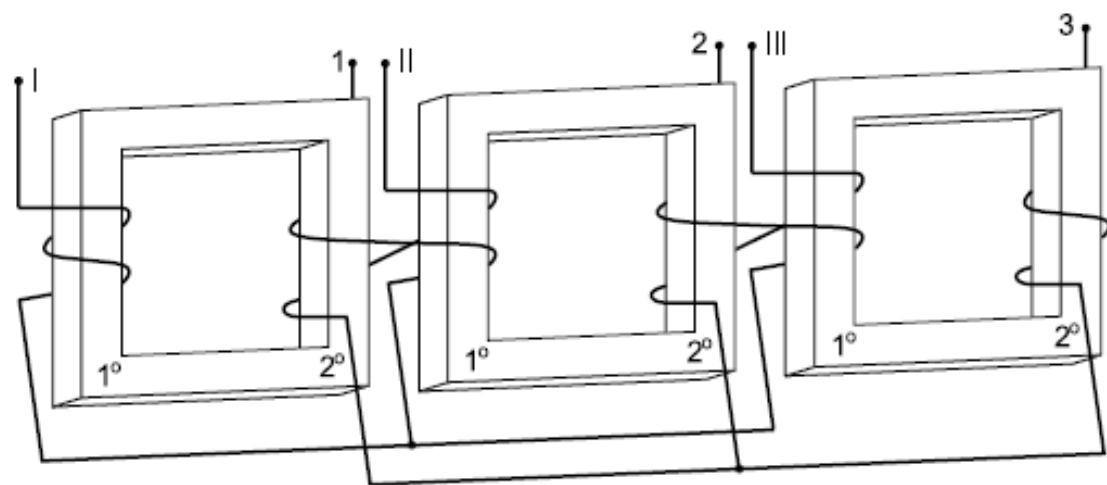


FIGURA 4.38. Banco de transformadores.

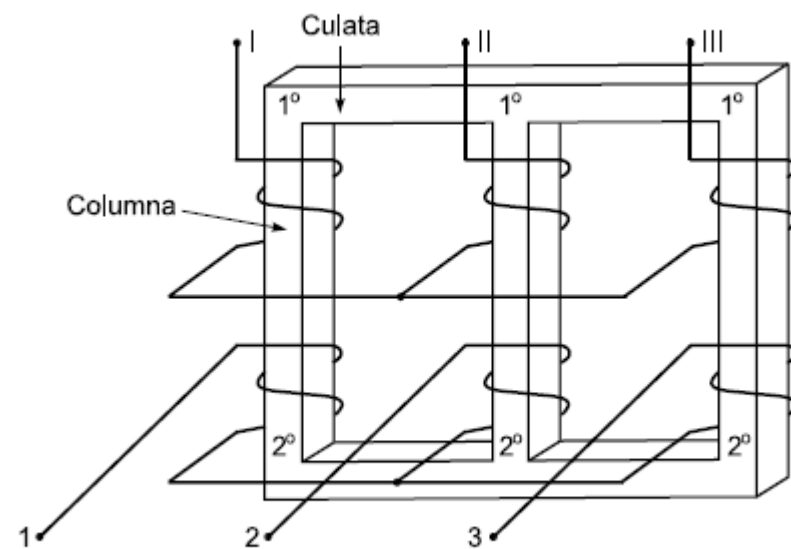


FIGURA 4.39. Transformador de núcleo trifásico.

Tipos de conexiones de trafos. trifásicos

Estrella: Y (en el lado de A.T.), y (en el lado de B.T.).
Triángulo: D ("), d (").
Zig-zag: Z ("), z (").

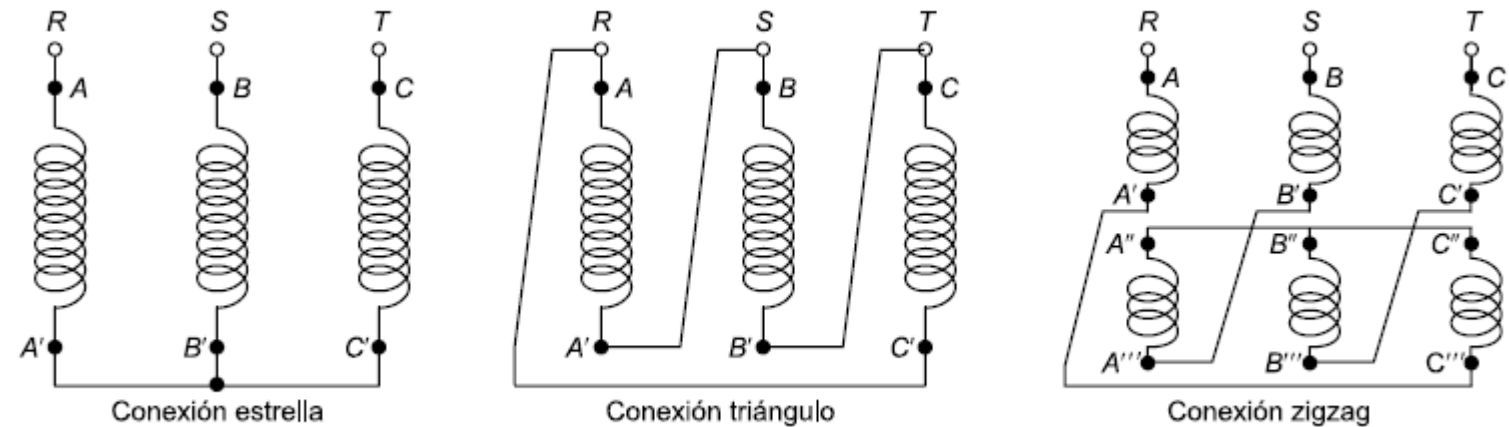


FIGURA 4.40. Tipos de conexiones en transformadores trifásicos.

$$F = G \frac{m_1 m_2}{d^2}$$

$$i\hbar \frac{\partial}{\partial t} \psi = \hat{H} \psi$$

$$\phi(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma}} e^{-\frac{x^2}{2\sigma^2}}$$

$$E = mc^2$$

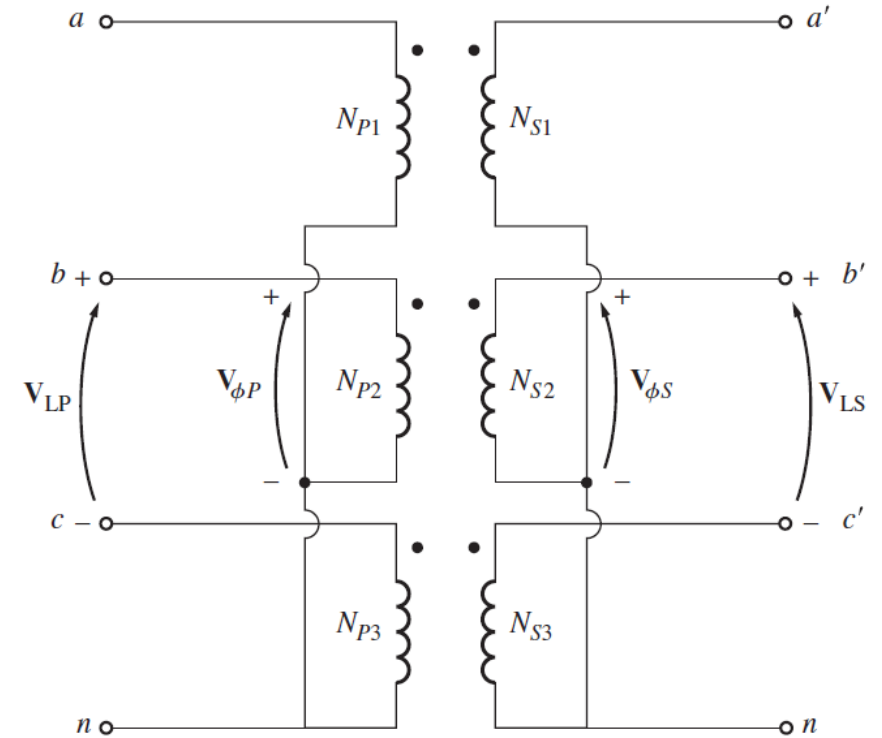
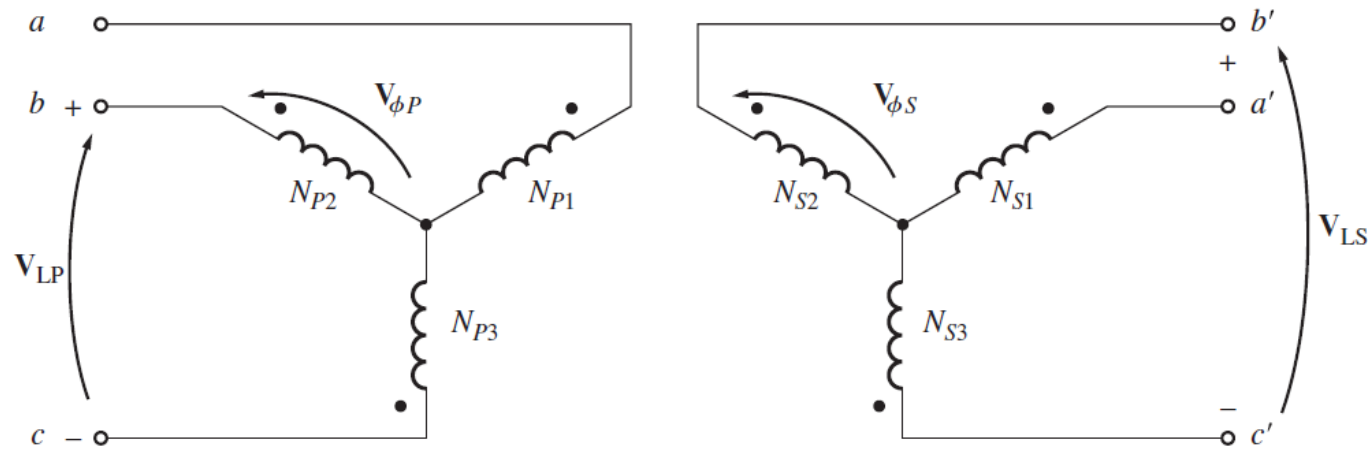
$$\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = c^2 \frac{\partial^2 u}{\partial x^2}$$

$$\frac{df}{dt} =$$

Clase 12

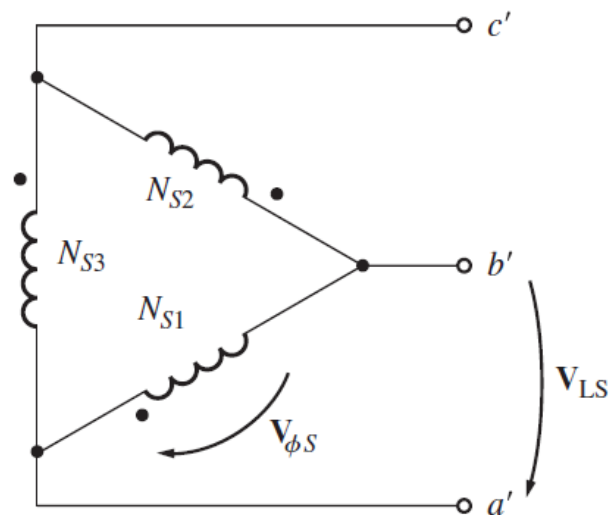
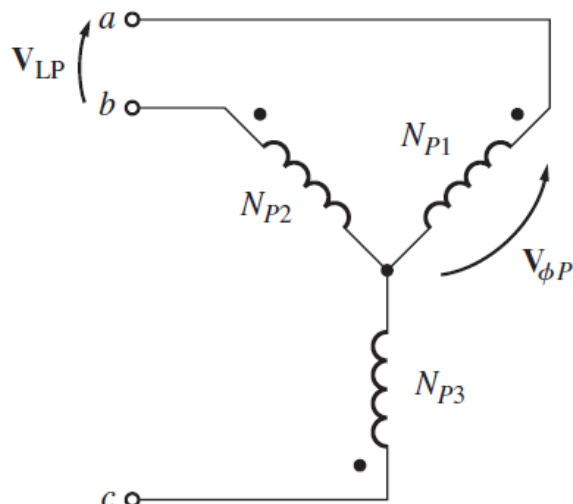
1. Tipos de conexiones e índice horario
2. Equivalente monofásico
3. Acoplamiento de trafos. en paralelo

Conexión Yy



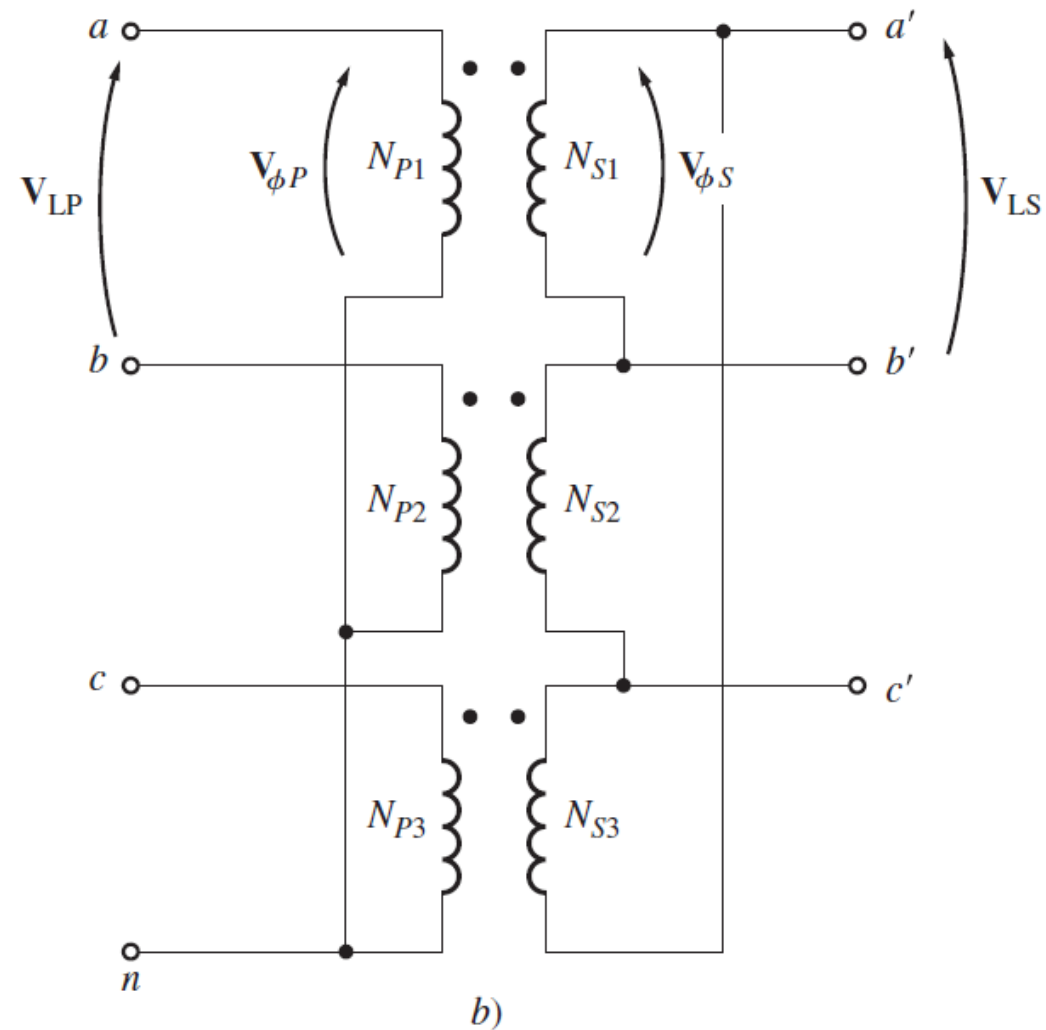
$$\frac{V_{LP}}{V_{LS}} = \frac{\sqrt{3}V_{\phi P}}{\sqrt{3}V_{\phi S}} = a \quad \text{Y-Y}$$

Conexión Yd

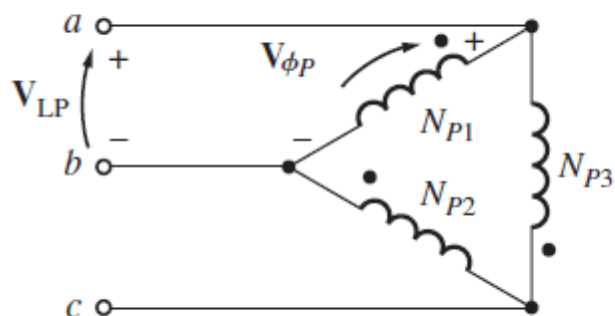


$$\frac{V_{LP}}{V_{LS}} = \frac{\sqrt{3}V_{\phi P}}{V_{\phi S}}$$

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

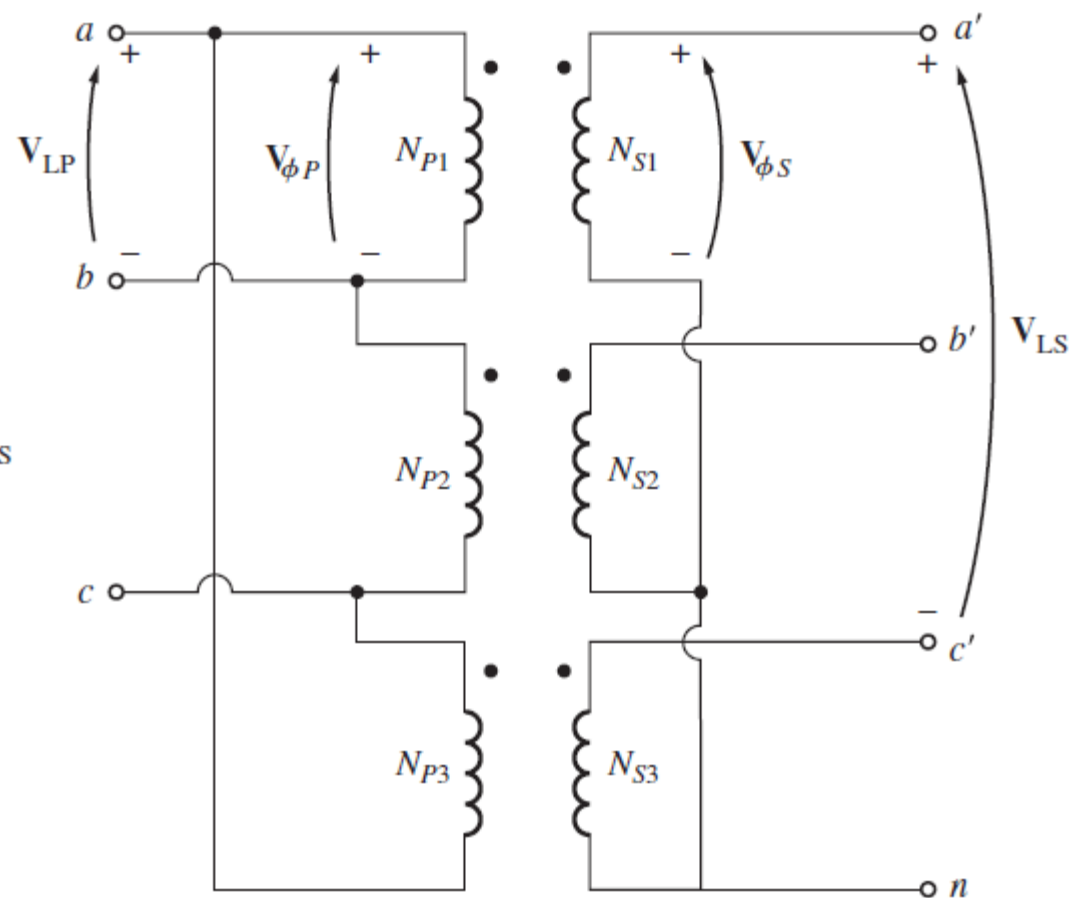
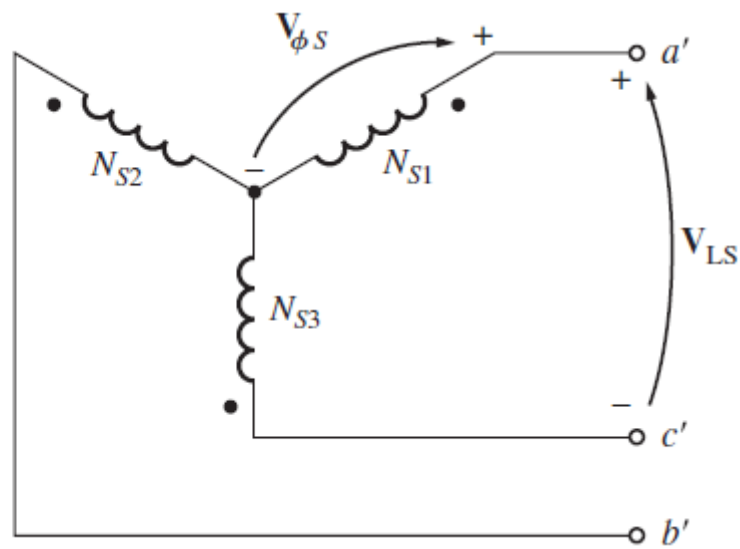


Conexión Dy



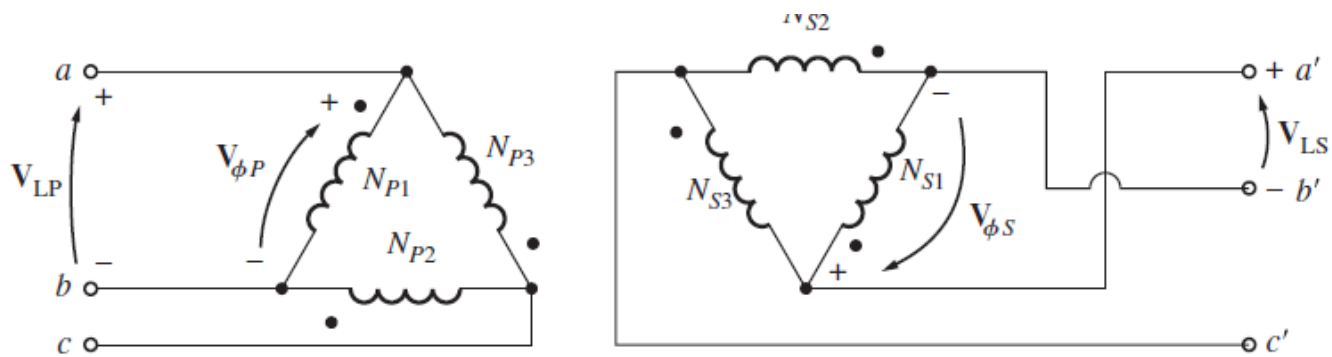
$$\frac{V_{LP}}{V_{LS}} = \frac{V_{\phi P}}{\sqrt{3}V_{\phi S}}$$

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

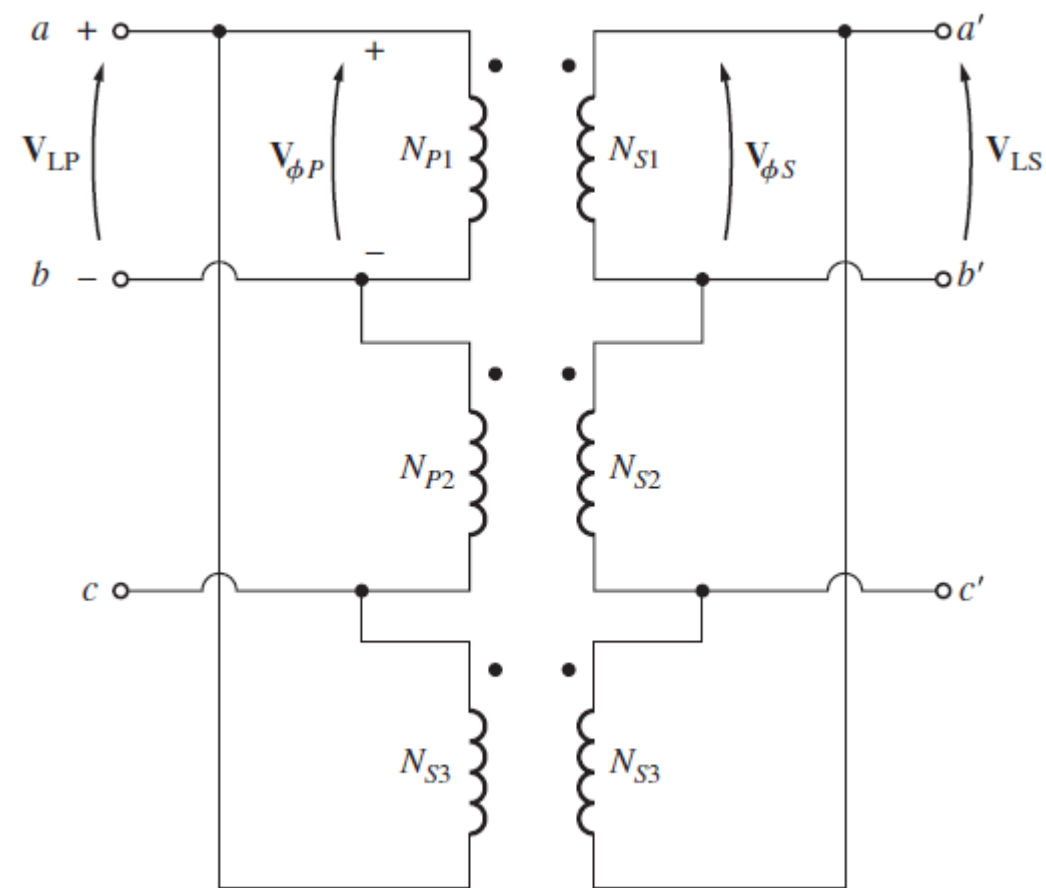


c)

Conexión Dd



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



Indice horario (grados)	Símbolo acoplam.	Diagrama fasorial A.T. B.T.	Indice horario (grados)	Símbolo acoplam.	Diagrama fasorial A.T. B.T.
0 (0°)	Dd0		6 (180°)	Dd6	
	Yy0			Yy6	
	Dz0			Dz6	
5 (150°)	Dy5		11 (330°)	Dy11	
	Yd5			Yd11	
	Yz5			Yz11	

Tipos de acoplamientos usados en la práctica

Contenido:

1. Definición:

- El **índice horario** indica el **desfase angular** entre los voltajes de línea primario y secundario en transformadores trifásicos.
- Se representa como un número múltiplo de **30°** (análogo a las horas en un reloj).

2. Cálculo:

- Cada hora = **30°** de desfase.
- Fórmula:

$$\text{Índice Horario} = \frac{\text{Ángulo de desfase}}{30^\circ}$$

- Ejemplo: Desfase de **150°** → Índice **5** ($5 \times 30^\circ = 150^\circ$).

3. Determinación Práctica:

Los pasos necesarios para analizar una conexión trifásica y determinar su índice horario son:

- 1.º Representar las tensiones compuestas del primario ($\underline{U}_{I\ II}$, $\underline{U}_{II\ III}$, $\underline{U}_{III\ I}$).
- 2.º Obtener las tensiones por fase de los bobinados del primario ($\underline{V}_{AA'}$, $\underline{V}_{BB'}$, $\underline{V}_{CC'}$) en función de las tensiones compuestas y del tipo de conexión realizada en el primario.
- 3.º A partir de las tensiones por fase del primario ($\underline{V}_{AA'}$, $\underline{V}_{BB'}$, $\underline{V}_{CC'}$), representar las tensiones por fase de los bobinados del secundario ($\underline{V}_{aa'}$, $\underline{V}_{bb'}$, $\underline{V}_{cc'}$), sabiendo que están en fase y que sus magnitudes están en la relación del número de espiras correspondientes.
- 4.º Obtener las tensiones compuestas del secundario ($\underline{U}_{12}$, $\underline{U}_{23}$, $\underline{U}_{31}$) a partir de las tensiones por fase de los bobinados del secundario y en función de la conexión realizada en el mismo.
- 5.º Calcular el índice horario, la denominación y la relación de transformación a partir del análisis de las tensiones compuestas del primario y secundario.

EJEMPLO DE APLICACIÓN 3.8

Se conecta un transformador trifásico reductor a una línea de 20 kV y absorbe 20 A. Si la relación de espiras por fase es igual a 100, calcular la tensión compuesta y la corriente de línea en el secundario del transformador, para las siguientes conexiones: a) Estrella-estrella. b) Triángulo-triángulo. c) Estrella-triángulo. d) Triángulo-estrella. NOTA: Se desprecian las pérdidas del transformador.

La potencia del transformador es en todos los casos igual a:

$$S = \sqrt{3} V \cdot I = \sqrt{3} \cdot 20.000 \cdot 20 \approx 693 \text{ kVA}$$

En las diferentes conexiones, se tiene:

a) **Estrella-estrella:** La tensión simple de primario será:

$$V_1 = \frac{20.000}{\sqrt{3}}$$

y la corriente de cada fase coincide con la de la línea, es decir, $I_1 = 20 \text{ A}$. Los valores simples secundarios vendrán ligados por la relación de transformación, de acuerdo con la siguiente ecuación:

$$m = 100 = \frac{V_1}{V_2} = \frac{I_1}{I_2}$$

de donde se deduce:

$$V_2 = \frac{200}{\sqrt{3}} \quad ; \quad I_2 = 2.000 \text{ A}$$

que en valores compuestos corresponden a 200 V y 2.000 A.

- b) **Triángulo-triángulo:** De forma análoga al caso anterior, se deducen unos valores de línea igual a 200 V y 2.000 A en el secundario.
- c) **Estrella-triángulo:** Los valores simples de primario, teniendo en cuenta que está conectado en estrella, serán:

$$V_1 = \frac{20.000}{\sqrt{3}} \quad ; \quad I_1 = 20 \text{ A}$$

Los valores simples de tensión y corriente secundaria, de acuerdo con la relación de transformación, dan:

$$V_2 = \frac{200}{\sqrt{3}} \quad ; \quad I_2 = 2.000 \text{ A}$$

que teniendo en cuenta que este devanado está conectado en triángulo, corresponde a unos valores de línea de $200/\sqrt{3}$ voltios y $2.000\sqrt{3}$ amperios.

- d) **Triángulo-estrella:** La tensión y corriente de cada fase del primario al estar conectado este devanado en triángulo son:

$$V_1 = 20.000 \text{ V} \quad ; \quad I_1 = \frac{20}{\sqrt{3}} \text{ A}$$

y los valores correspondientes en secundario serían:

$$V_2 = 200 \text{ V} \quad ; \quad I_2 = \frac{2.000}{\sqrt{3}} \text{ A}$$

quie teniendo en cuenta que este devanado está en estrella, resultan unos valores de línea de $200\sqrt{3}$ y $2.000/\sqrt{3}$ A.

EJEMPLO DE APLICACIÓN 3.11. CIRCUITO EQUIVALENTE MONOFÁSICO DE UN SISTEMA TRIFÁSICO

La Figura 3.42 muestra el esquema de una instalación trifásica equilibrada. Se dispone de un transformador de 50 kVA, conexión Dyl, relación compuesta 15.000/380 V, con las siguientes tensiones relativas de cortocircuito: $\varepsilon_{cc} = 10$ por 100; $\varepsilon_{x_{cc}} = 8$ por 100, que alimenta por su secundario una carga equilibrada en estrella de $5 \angle 0^\circ \Omega$ /fase a través de una línea de impedancia $0,1 + j0,2 \Omega$ /hilo. Calcular: a) Parámetros R_{cc} , X_{cc} y Z_{cc} del circuito equivalente aproximado del transformador reducido al primario. b) Si se aplica al primario una tensión trifásica equilibrada de 15 kV de línea (lectura del voltímetro V_1), determinar las lecturas de los voltímetros V_A y V_B .

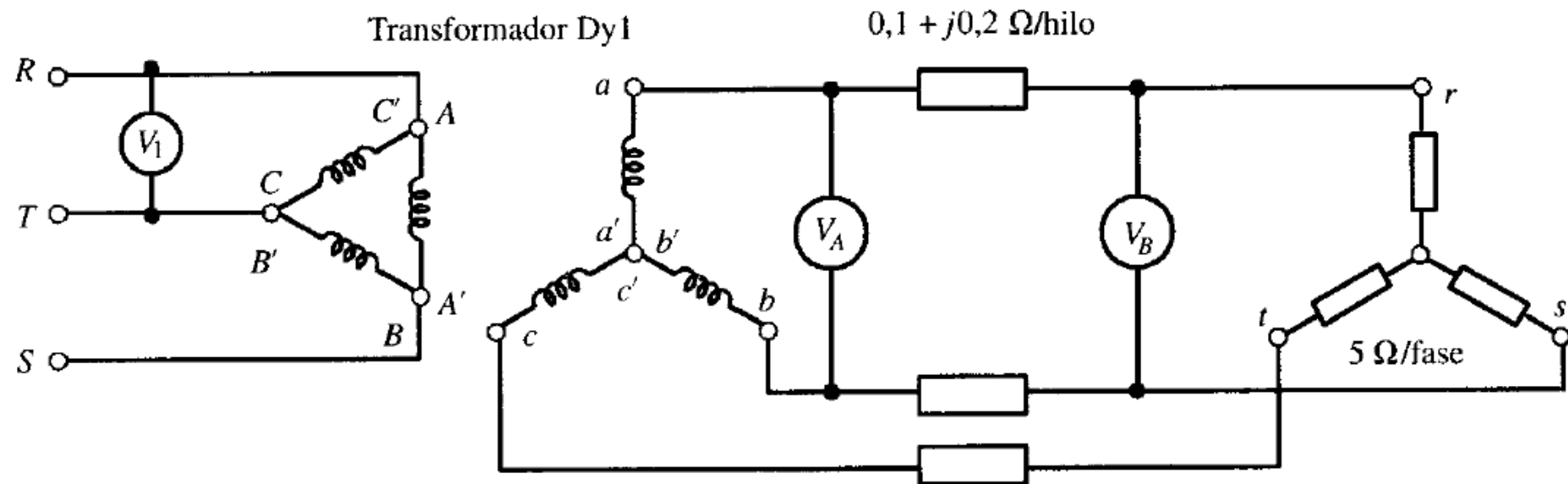


Figura 3.42.

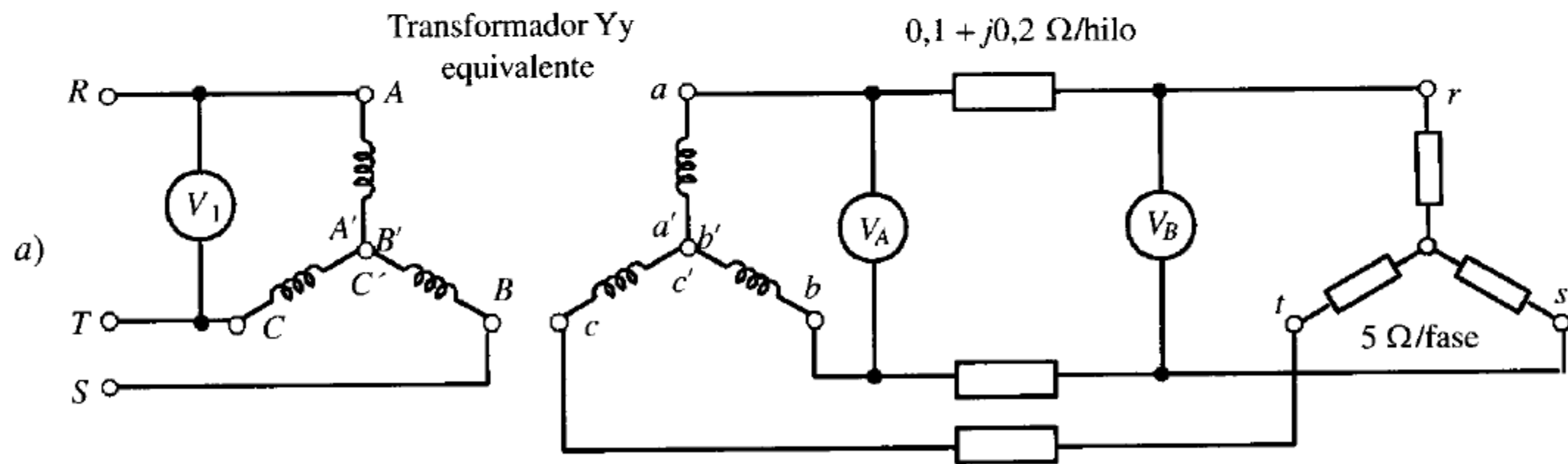
SOLUCIÓN

Los problemas de transformadores trifásicos se pueden resolver por dos procedimientos distintos: a) desde el punto de máquina eléctrica, teniendo en cuenta la configuración interna real física con la que se unen los devanados. Este procedimiento suele ser más útil cuando solamente se analiza el transformador; b) desde el punto de sistema eléctrico de potencia completo.

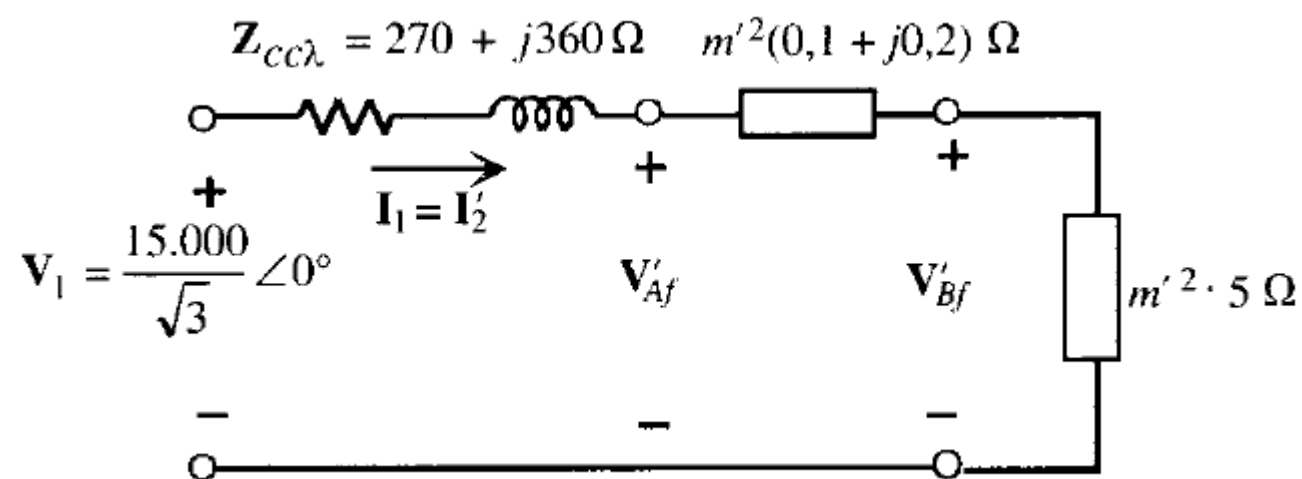
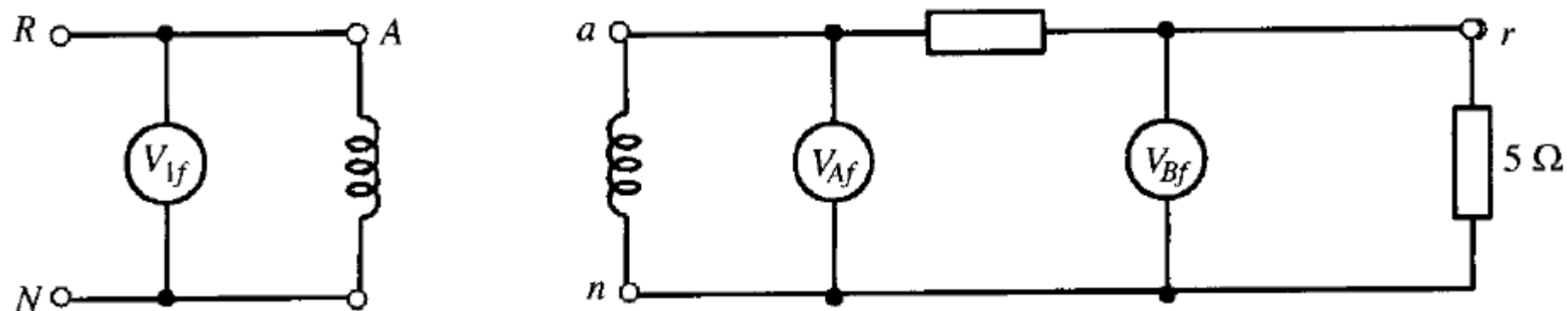
Cuando el transformador es un componente más de un sistema eléctrico de potencia, el ingeniero no está tan interesado en lo que sucede dentro de cada columna del transformador sino en las modificaciones que éste produce en los niveles de corrientes y tensiones de la red. En esta situación es más práctico desarrollar un circuito equivalente monofásico de todo el conjunto: red de alimentación, transformador, líneas e impedancias de carga, lo que se resuelve más fácilmente si todas las fuentes (red), devanados del transformador y cargas se suponen conectados en estrella. En el caso de que algún componente de la red esté realmente conectado en triángulo, deberá obtenerse su equivalente en estrella de acuerdo con las reglas de transformación triángulo-estrella que se utiliza en la teoría de los circuitos trifásicos.

2. Segundo procedimiento. Desde el punto de vista de sistema eléctrico

En esta situación, y tal como ya se ha indicado en la introducción al problema, conviene analizar la red en todo su conjunto, para lo cual hay que conseguir un equivalente monofásico de todo el sistema, lo que requiere transformar todos los elementos que estén conectados en triángulo en una estrella equivalente. En este problema solamente es el primario del transformador el que está conectado en triángulo, por lo que vamos a preparar un circuito equivalente al de la Figura 3.42 pero con el primario en estrella. En la Figura 3.44a se muestra el esquema correspondiente y en la Figura 3.44b se representa el circuito equivalente por fase de todo el sistema: red de alimentación, transformador y carga.



$$m' = \frac{15.000 / \sqrt{3}}{380 / \sqrt{3}} = \frac{15.000}{380} = 39,47$$





INTRODUCCIÓN AL ACOPLAMIENTO EN PARALELO DE TRANSFORMADORES

Objetivo Principal:

- Aumentar la capacidad de potencia disponible cuando un solo transformador no puede satisfacer la demanda de carga

Alcance de Aplicación:

- ✓ Transformadores monofásicos
 - ✓ Transformadores trifásicos
 - ✓ Diferentes niveles de potencia (si cumplen condiciones)
- 

Ventajas Clave:

1. **Flexibilidad operativa** - Posibilidad de añadir/remover unidades según demanda
2. **Redundancia** - Continuidad de servicio ante fallas
3. **Eficiencia** - Operación óptima en variaciones de carga

Consideraciones Especiales:

- Requiere verificación estricta de parámetros técnicos
- Necesita sistemas de protección coordinados
- Permite mantenimiento sin interrupción de servicio



Ejemplos Prácticos:

- Subestaciones de distribución urbana
- Sistemas industriales de gran demanda
- Centros de datos críticos

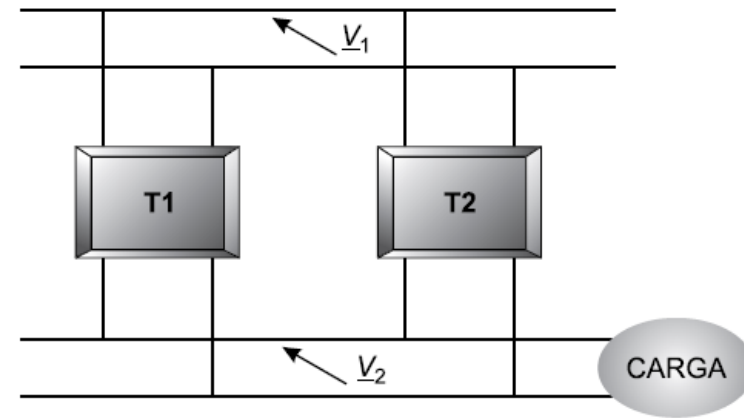
Nota: El éxito de la operación en paralelo depende del cumplimiento riguroso de las condiciones técnicas que se detallarán a continuación.



CONDICIONES PARA ACOPLAMIENTO DE TRANSFORMADORES MONOFÁSICOS EN PARALELO

Condiciones Obligatorias:

- Relación de transformación idéntica (V_p/V_s)
- Polaridad correcta en las conexiones



Acoplamiento en paralelo de dos transformadores.

Condiciones Recomendadas:

- Igual tensión de cortocircuito (u_z) → Distribución equilibrada de carga
- Misma relación u_R/u_X → Corrientes en fase entre transformadores

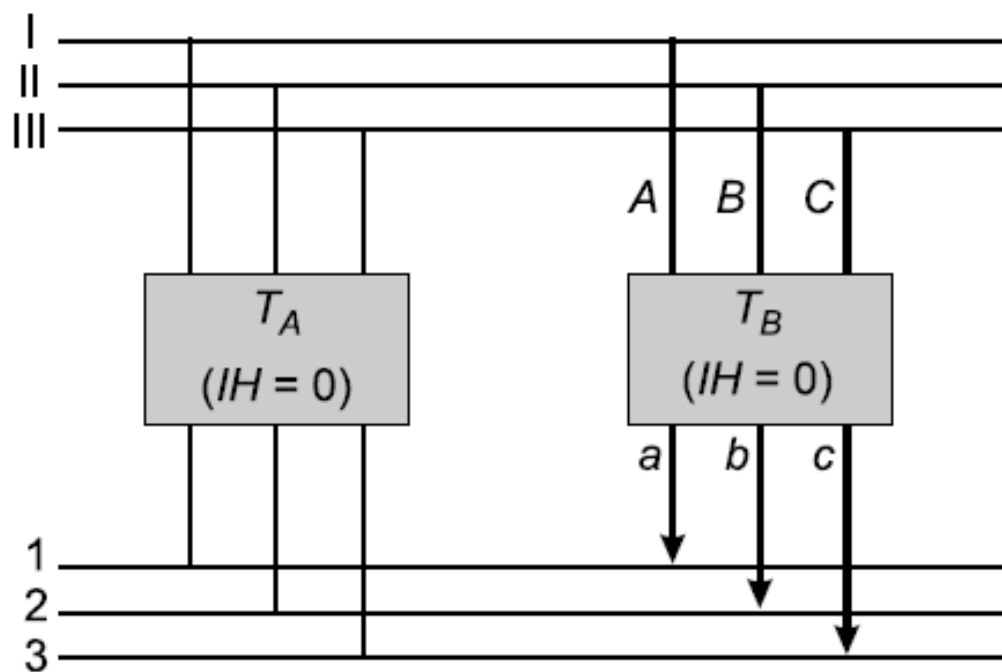
CONEXIÓN EN PARALELO DE TRANSFORMADORES TRIFÁSICOS

Condiciones Imprescindibles:

1. **Índice horario idéntico** (mismo desfase primario-secundario)
2. **Polaridad correcta** (orden de fases idéntico)
3. **Igual relación de transformación** (para tensiones compuestas)

Condiciones Recomendables:

4. **Tensión de cortocircuito (u_Z) igual**
5. **Misma relación u_R/u_X** (ángulos de impedancia equivalentes)



$$\underline{U}_{ab}^{T_A} = \underline{U}_{ab}^{T_B} = \underline{U}_{12}$$

$$\underline{U}_{bc}^{T_A} = \underline{U}_{bc}^{T_B} = \underline{U}_{23}$$

$$\underline{U}_{ca}^{T_A} = \underline{U}_{ca}^{T_B} = \underline{U}_{31}$$

Acoplamiento de transformadores del mismo índice horario.