

7300
M.S. ING. EDUARDO LEON CASTRO

PROFESOR PRINCIPAL DE LA
FACULTAD DE INGENIERIA EN
ELECTRICIDAD Y COMPUTACION

**TEORIA Y PROBLEMAS DE
APLICACION DE LOS
TRANSFORMADORES**

**ESCUELA SUPERIOR POLITECNICA
DEL LITORAL**

1-14; 15,28; 29-36; 37-44; 45-49

TEORIA Y PROBLEMAS DE APLICACION DE LOS TRANSFORMADORES

CONTENIDO

CAPITULO I

IMPORTANCIA DE LOS TRANSFORMADORES

- 1.1 DESCRIPCION DE UN SISTEMA ELECTRICO
- 1.2 VENTAJAS DEL TRANSFORMADOR
- 1.3 CLASIFICACION DE LOS TRANSFORMADORES

CAPITULO II

TEORIA DE LOS TRANSFORMADORES

- 2.1 PRINCIPIO DE OPERACION DEL TRANSFORMADOR
- 2.2 CONSTRUCCION DEL TRANSFORMADOR
 - a. TRANSFORMADOR MONOFASICO
 - b. TRANSFORMADOR TRIFASICO
- 2.3 TRANSFORMADOR EN VACIO
 - a. FLUJO MAGNETICO DEL NUCLEO DEL TRANSFORMADOR
 - b. CORRIENTE DE EXCITACION DEL TRANSFORMADOR
- 2.4 TRANSFORMADOR IDEAL
 - a. CONDICIONES DEL TRANSFORMADOR IDEAL
 - b. RELACIONES DE TRANSFORMACION DEL TRANSFORMADOR
- 2.5 CIRCUITO EQUIVALENTE DEL TRANSFORMADOR
- 2.6 DIAGRAMA FASORIAL DEL TRANSFORMADOR CON FACTOR DE POTENCIA EN ATRASO
 - a. DIAGRAMA FASORIAL DEL TRANSFORMADOR REAL
 - b. DIAGRAMA FASORIAL DEL CIRCUITO EQUIVALENTE
- 2.7 DIAGRAMA FASORIAL DEL TRANSFORMADOR CON FACTOR DE POTENCIA EN ADELANTO

- a. DIAGRAMA FASORIAL DEL TRANSFORMADOR REAL
- b. DIAGRAMA FASORIAL DEL CIRCUITO EQUIVALENTE

2.8 CIRCUITOS APROXIMADOS DEL TRANSFORMADOR

2.9 PRUEBAS DE CIRCUITO ABIERTO Y CORTOCIRCUITO DEL TRANSFORMADOR

- a. PRUEBA DE CIRCUITO ABIERTO
- b. PRUEBA DE CORTOCIRCUITO

2.10 REGULACION DE TENSION DEL TRANSFORMADOR

2.11 RENDIMIENTO DEL TRANSFORMADOR

- a. PERDIDAS DE HISTERESIS
- b. PERDIDAS DE CORRIENTES DE EDDY
- c. PERDIDAS DE COBRE
- d. INCIDENCIA DE LAS PERDIDAS EN EL RENDIMIENTO

2.12 POLARIDAD DEL TRANSFORMADOR

2.13 TRANSFORMADOR TRIFASICO

2.14 AUTO TRANSFORMADOR

CAPITULO III

CONEXIONES DE LOS TRANSFORMADORES

3.1 CONEXIONES DEL TRANSFORMADOR MONOFASICO

3.2 CONEXION DE TRANSFORMADORES MONOFASICOS EN PARALELO

- a. CIRCUITO EQUIVALENTE DE TRANSFORMADORES MONOFASICOS EN PARALELO
- b. DIAGRAMA FASORIAL DE TRANSFORMADORES MONOFASICOS EN PARALELO
- c. CONDICION PARA QUE CADA TRANSFORMADOR TRABAJE A PLENA CARGA
- d. FACTOR DE POTENCIA DE CADA TRANSFORMADOR

3.3 CONEXION TRIFASICA ESTRELLA - ESTRELLA

- a. DIAGRAMAS FASORIALES DE LOS VOLTAJES
- b. DIAGRAMAS FASORIALES DE LAS CORRIENTES
- c. RELACIONES DE TRANSFORMACION

TEORIA Y PROBLEMAS DE APLICACION DE LOS TRANSFORMADORES

CAPITULO I

IMPORTANCIA DE LOS TRANSFORMADORES

1.1 DESCRIPCION DE UN SISTEMA ELECTRICO

Un sistema eléctrico esta constituido de la siguiente manera:

- Generación
- Transmisión
- Subtransmisión
- Distribución Primaria
- Distribución Secundaria

El esquema de la constitución de un sistema eléctrico típico se presenta en la Fig. 1.1

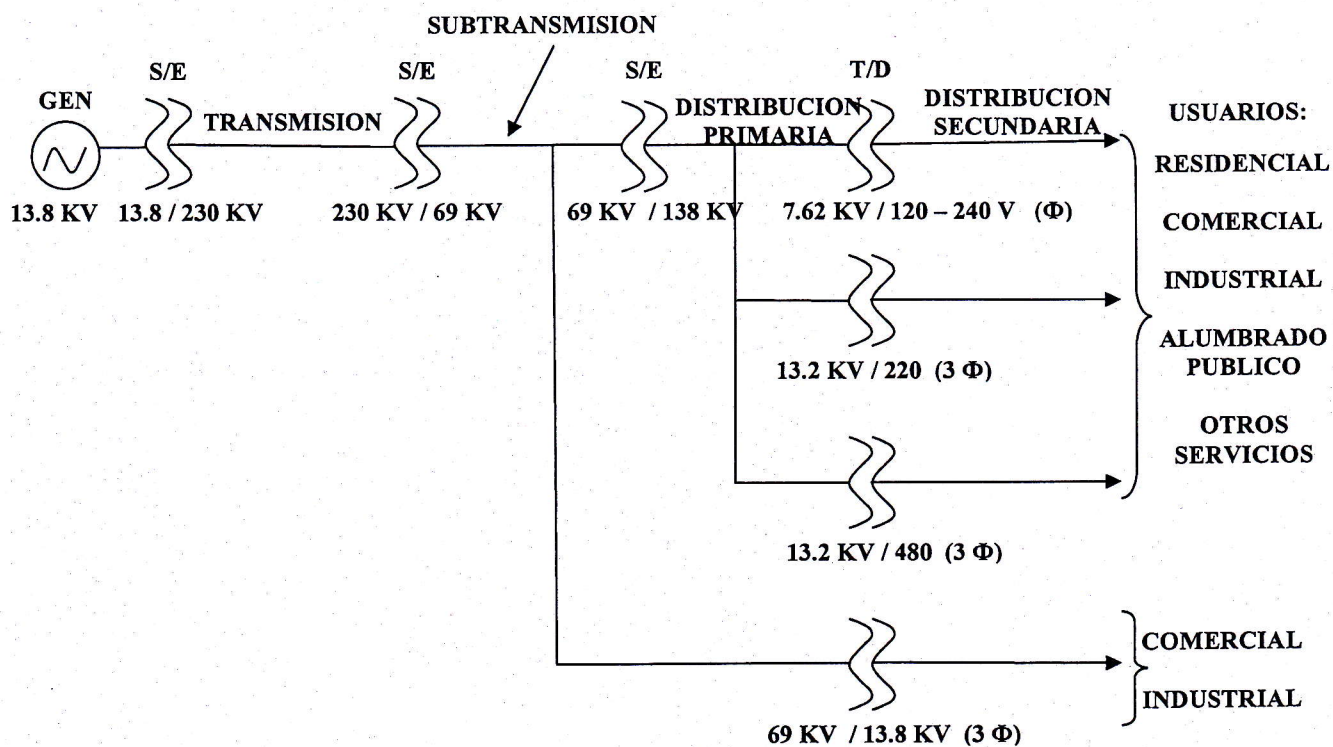


Fig. 1.1 SISTEMA ELECTRICO TIPICO

TEORIA Y PROBLEMAS DE APLICACION DE LOS TRANSFORMADORES

CAPITULO I

IMPORTANCIA DE LOS TRANSFORMADORES

1.1 DESCRIPCION DE UN SISTEMA ELECTRICO

Un sistema eléctrico esta constituido de la siguiente manera:

- Generación
- Transmisión
- Subtransmisión
- Distribución Primaria
- Distribución Secundaria

El esquema de la constitución de un sistema eléctrico típico se presenta en la Fig. 1.1

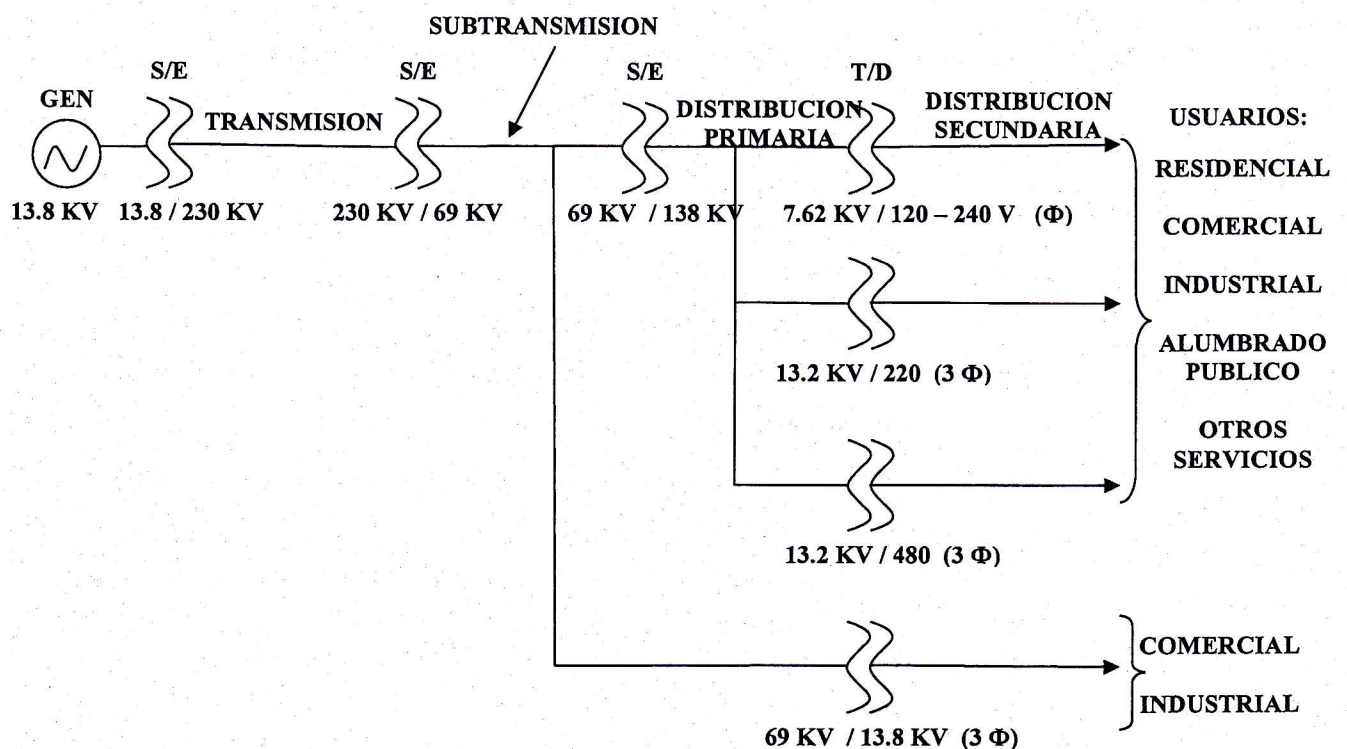


Fig. 1.1 SISTEMA ELECTRICO TIPICO

El transformador es la máquina eléctrica de vital importancia y de mayor utilización, porque permite en el sistema eléctrico típico lo siguiente:

- Elevar el voltaje de generación de la energía eléctrica de 13.8 KV al voltaje de transmisión de 230 KV, para conducir la energía eléctrica de los centros de generación a los centros de carga con pérdidas mínimas y la menor caída de tensión.
- Bajar el voltaje de transmisión de 230 KV al voltaje de subtransmisión de 69 KV para distribuir la energía eléctrica en grandes bloques en los centros de carga.
- Bajar el voltaje de subtransmisión de 69 KV al voltaje de distribución primaria de 13.8 KV, para distribuir la energía eléctrica a las diferentes áreas de servicio de los usuarios.
- Bajar el voltaje de distribución primaria de 13.2 KV a los voltajes que requieren los usuarios de la energía eléctrica, sean estos residenciales, comerciales, industriales, alumbrado público y otros servicios.

1.2 VENTAJAS DEL TRANSFORMADOR

Las ventajas del transformador en un sistema eléctrico son las siguientes:

- El transformador hace posible generar la energía eléctrica al voltaje mas económico, porque al incrementar el voltaje de generación se requiere de mayor nivel de aislamiento eléctrico (BIL) de los devanados del generador eléctrico, lo cual aumenta el costo de ésta máquina.
- El transformador permite que la transmisión de la energía eléctrica se la efectúe al voltaje más económico, porque al aumentar el voltaje del sistema de transmisión se reducen las pérdidas de energía eléctrica.
- El transformador hace posible que los usuarios puedan utilizar la energía eléctrica al voltaje que requieren los diferentes equipos eléctricos.

1.3 CLASIFICACION DE LOS TRANSFORMADORES

De acuerdo a la utilización del transformador en un sistema eléctrico se tiene la siguiente clasificación:

- Transformador de potencia
- Transformador de distribución
- Transformador de tensión
- Transformador de corriente
- Autotransformador

El transformador de potencia es de una capacidad superior a los 5 MVA y se lo instala en las subestaciones de los sistemas de generación, transmisión y subtransmisión.

El transformador de distribución es de una capacidad inferior de 5 MVA y se lo instala para dar servicio de energía eléctrica a los usuarios.

El transformador de tensión sirve para reducir el nivel de voltaje y conectar los elementos de los sistemas de medición y protección de los sistemas eléctricos.

El transformador de corriente sirve para reducir el nivel de la corriente y conectar los elementos de los sistemas de medición y protección de los sistemas eléctricos.

El autotransformador permite reducir o aumentar el voltaje utilizando un solo devanado.

TEORIA Y PROBLEMAS DE APLICACION DE LOS TRANSFORMADORES

CAPITULO II

TEORIA DE LOS TRANSFORMADORES

2.1 PRINCIPIO DE OPERACION DEL TRANSFORMADOR

El transformador es el equipo eléctrico que sirve para transferir energía eléctrica de un nivel de voltaje a otro.

El transformador en su forma elemental esta constituido por dos circuitos eléctricos que son los devanados primario y secundario y un circuito magnético en el núcleo. El devanado primario tiene N_1 vueltas y el devanado secundario N_2 vueltas. Un diagrama del transformador se presenta en la Fig. 2.1.

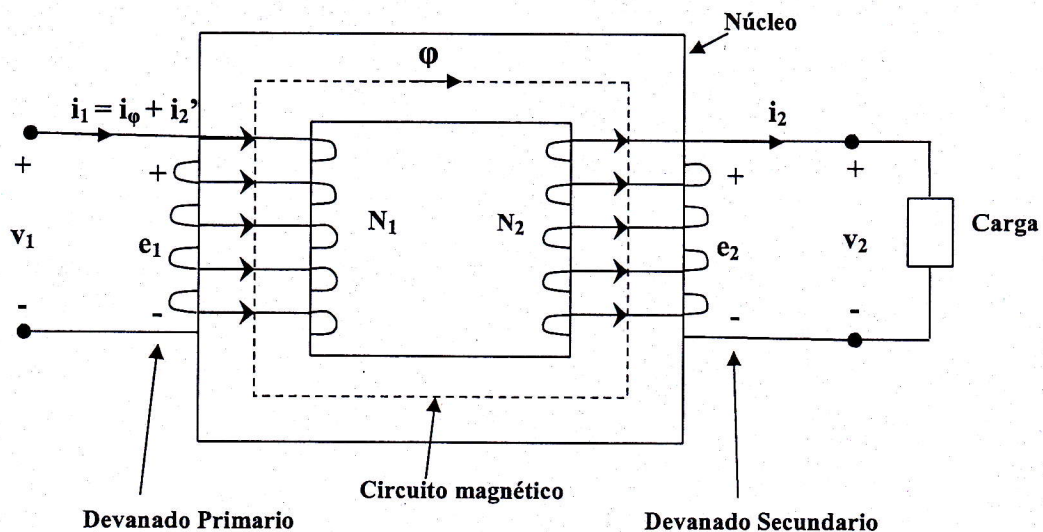


Fig. 2.1 CIRCUITOS DEL TRANSFORMADOR

El devanado primario es alimentado con el voltaje v_1 y la corriente de excitación i_ϕ produce el flujo magnético Φ en el núcleo. Debido a las leyes de Faraday y de Lenz, la

fm $i_1 N_1$ induce la fem e_1 en el devanado primario y la fem e_2 en el devanado secundario:

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

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

Cuando se conecta la carga en el devanado secundario, la corriente i_2 tiene un efecto desmagnetizante con respecto al flujo magnético ϕ que ha inducido la fem e_2 . Por esta razón la corriente del devanado primario i_1 tiene la componente i_2' para contrarrestar el efecto desmagnetizante de la corriente i_2 .

2.2 CONSTRUCCION DEL TRANSFORMADOR

Desde el punto de vista de la construcción del transformador, los devanados primario y secundario son de cobre o aluminio y el núcleo es de acero magnético.

El transformador puede ser de tipo acorazado y tipo núcleo. El tipo acorazado se lo utiliza en la construcción de los transformadores monofásicos y el tipo núcleo se lo utiliza en la construcción de los transformadores trifásicos.

a. TRANSFORMADOR MONOFASICO

El transformador monofásico es de tipo acorazado y el acero magnético del núcleo envuelve por igual a los devanados primario y secundario. El devanado de baja tensión B.T. se instala en el interior y el de alta tensión A.T. al exterior debido a que el devanado de alta tensión es el más susceptible de sufrir fallas. Esta disposición de los devanados permite realizar una reparación más fácil.

El transformador monofásico se presenta en la Fig. 2.2.

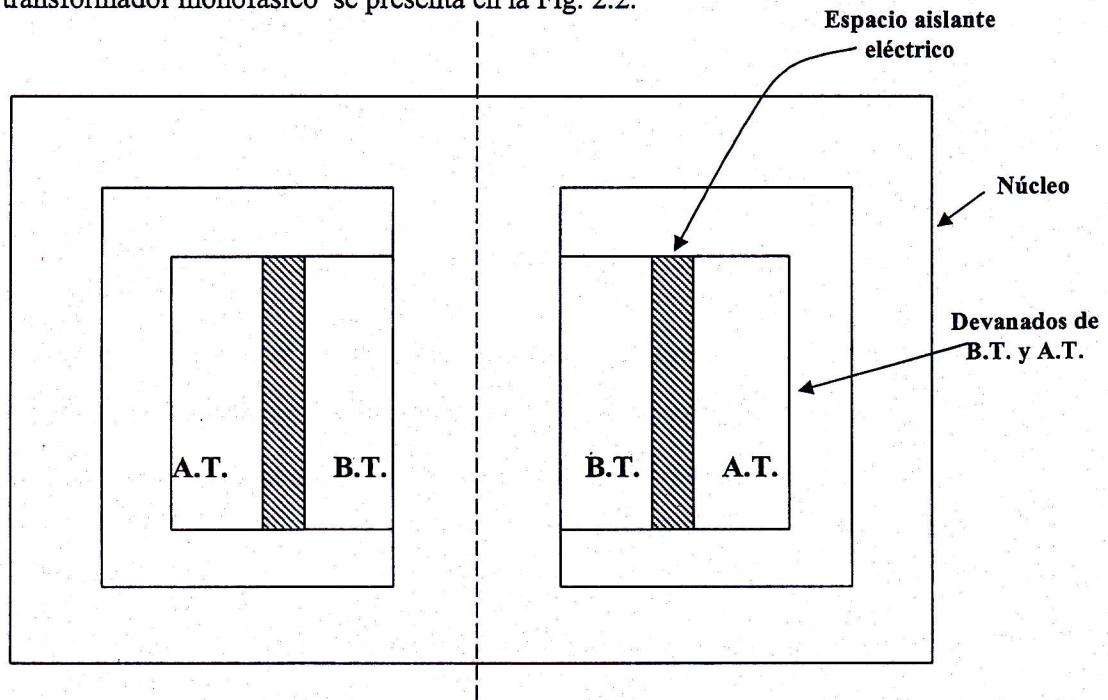


Fig. 2.2 TRANSFORMADOR MONOFASICO

b. TRANSFORMADOR TRIFASICO

El transformador trifásico es de tipo núcleo y se caracteriza por tener tres columnas en el núcleo y en cada columna se instala un grupo de los devanados de baja tensión y alta tensión que corresponden a una fase.

El devanado de baja tensión se dispone en el interior para alejar el peligro de un cortocircuito entre el núcleo y el devanado de alta tensión y facilita la reparación de este devanado cuando se producen fallas.

El transformador trifásico se presenta en la Fig. 2.3.

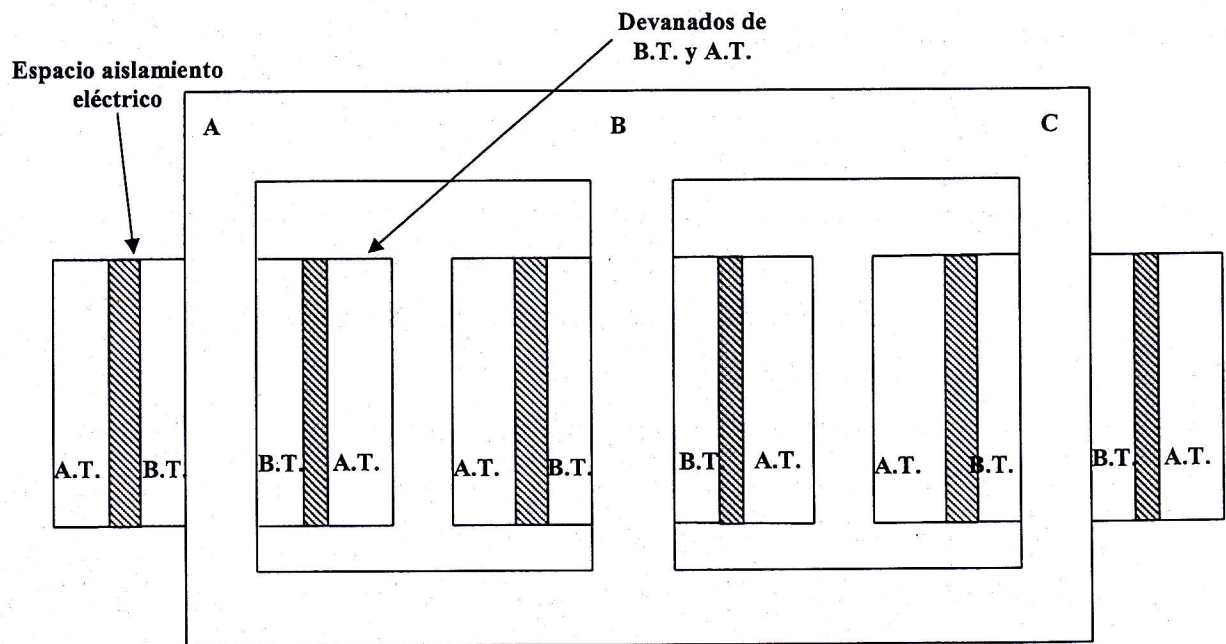


Fig. 2.3 TRANSFORMADOR TRIFASICO

2.3 TRANSFORMADOR EN VACIO

El transformador en vacío se lo estudia solamente para analizar la corriente de excitación i_ϕ . El transformador está en vacío cuando se alimenta el devanado primario y el secundario no tiene carga.

El transformador en vacío se presenta en la Fig. 2.4

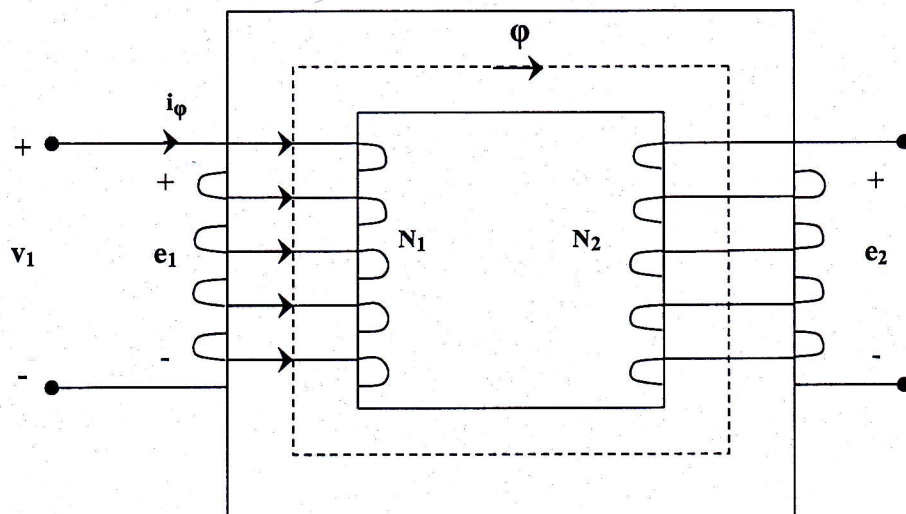


Fig. 2.4 TRANSFORMADOR EN VACIO

En el devanado primario se tiene la ecuación eléctrica:

$$v_1 = e_1 + i_\phi Z_1 \quad [\text{V}]$$

Donde:

v_1 = voltaje aplicado al devanado primario [voltios]

e_1 = fuerza contraelectromotriz del devanado primario [voltios]

i_ϕ = corriente de excitación [amperios]

Z_1 = impedancia del devanado primario [ohmios]

En la condición del transformador en vacío:

$$i_\phi Z_1 \ll v_1$$

Por lo tanto:

$$i_\phi Z_1 \approx 0 \quad \text{y} \quad v_1 = e_1$$

Como:

$$v_1 = V_{\max} \cos \omega t = \sqrt{2} \, V_1 \cos \omega t$$

$$e_1 = E_{\max} \cos \omega t = \sqrt{2} \, E_1 \cos \omega t$$

Se tiene que cumplir:

$$V_{\max} = E_{\max}$$

$$V_1 = E_1$$

a. FLUJO MAGNETICO DEL NUCLEO DEL TRANSFORMADOR

De acuerdo a la ley de Faraday la fem es:

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

Se procede a obtener la expresión del flujo magnético ϕ :

$$e_1 dt = N_1 d\phi$$

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

$$\varphi = \int \frac{e_1}{N_1} dt$$

$$\varphi = \int \frac{\sqrt{2}E_1}{N_1} \cos \omega t dt$$

$$\varphi = \frac{\sqrt{2}E_1}{\omega N_1} \sin \omega t$$

$$\varphi = \Phi_{\text{máx}} \sin \omega t$$

Con esto se concluye que si el voltaje aplicado al devanado primario v_1 es sinusoidal, el flujo magnético del núcleo φ también es sinusoidal.

Del valor máximo del flujo magnético $\Phi_{\text{máx}}$ se obtiene el valor RMS de la fem E_1 :

$$\Phi_{\text{máx}} = \frac{\sqrt{2}E_1}{\omega N_1}$$

$$E_1 = 4.44 \Phi_{\text{máx}} N_1 f \text{ [Voltios]}$$

Donde:

E_1 = valor RMS de la fem [voltios]

$\Phi_{\text{máx}}$ = valor máximo del flujo magnético [weber]

N_1 = número de vueltas del devanado primario

f = frecuencia [c.p.s].

Según la ley del circuito magnético:

$$\varphi = \frac{i_\varphi N_1}{\mathcal{R}_n} \text{ [weber]}$$

Donde:

φ = flujo magnético [weber]

i_φ = corriente de excitación [amperios]

N_1 = número de vueltas del devanado primario

\mathcal{R}_n = reluctancia del núcleo $\left[\frac{\text{amperio-vuelta}}{\text{weber}} \right]$

b. CORRIENTE DE EXCITACION DEL TRANSFORMADOR

La característica de magnetización del acero magnético del núcleo se presenta en la Fig. 2.5.

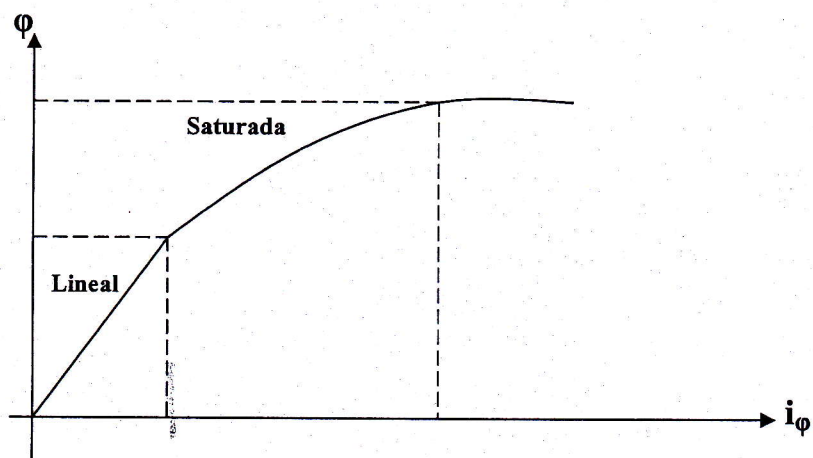


Fig. 2.5 CARACTERISTICA DE MAGNETIZACION DEL NUCLEO

En la parte lineal de la característica de magnetización se cumple que la corriente de excitación i_ϕ es proporcional al flujo magnético ϕ , es decir si el flujo magnético ϕ es sinusoidal también la corriente de excitación i_ϕ es sinusoidal.

Pero en la práctica el transformador trabaja en el codo de la característica de magnetización, por lo tanto para determinar la forma de la corriente de excitación i_ϕ se tiene que disponer de los diagramas de flujo magnético ϕ y la curva de magnetización, que se presentan en la Fig. 2.6.

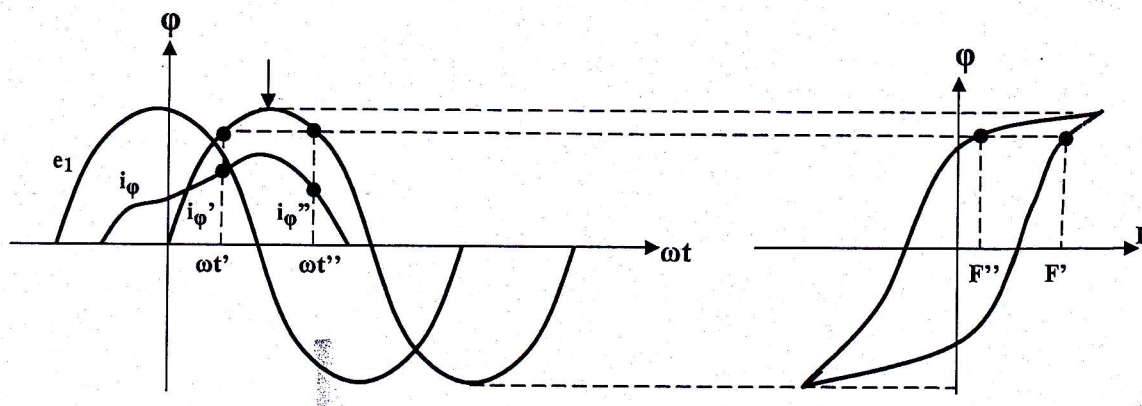


Fig. 2.6 DIAGRAMA DE LA CORRIENTE DE EXITACION i_ϕ

Para obtener la corriente de excitación i_ϕ se procede de la siguiente manera:

En el diagrama del flujo magnético ϕ vs ωt y para $\omega t'$ y $\omega t''$ se determinan los flujos magnéticos ϕ' y ϕ'' , estos valores del flujo magnético se los lleva a la curva de magnetización y se encuentran las fmms F' y F'' , para luego determinar las corrientes de excitación i_ϕ' y i_ϕ'' :

$$i_\phi' = \frac{F'}{N_1}$$

$$i_\phi'' = \frac{F''}{N_1}$$

De igual manera se obtienen los demás valores de la corriente de excitación i_ϕ .

La forma de la corriente de excitación i_ϕ es debido a las propiedades no lineales del acero magnético del núcleo, que es una curva simétrica con respecto al eje de las abscisas y se descompone en una fundamental y una serie de armónicas impares.

Es decir la corriente de excitación i_ϕ del transformador es una fuente de terceras armónicas y que es la armónica de mayor influencia.

2.4 TRANSFORMADOR IDEAL

El transformador ideal se lo estudia solamente para determinar las relaciones de transformación.

El transformador real se lo presenta en la Fig. 2.7.

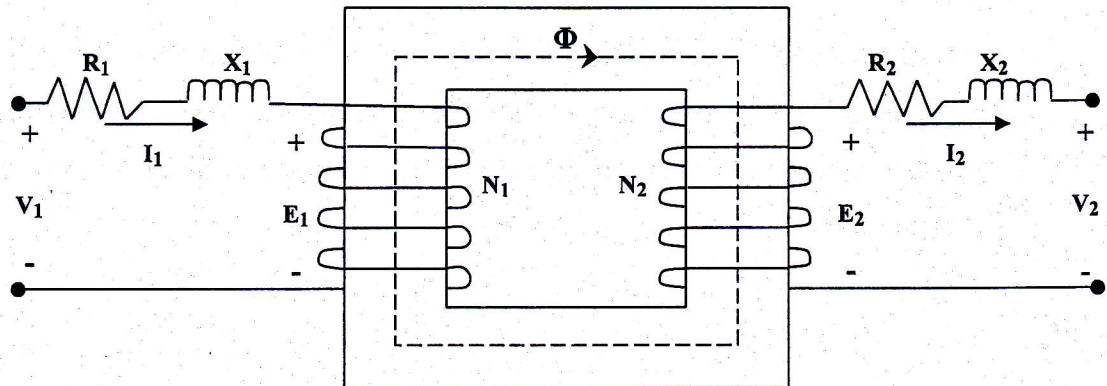


Fig. 2.7 TRANSFORMADOR REAL

a. CONDICIONES DEL TRANSFORMADOR IDEAL

Para convertir el transformador real en un transformador ideal se tiene que considerar lo siguiente:

- Las pérdidas de cobre son cero:

$$I_1^2 R_1 \approx 0 \text{ y } I_2^2 R_2 \approx 0$$

por lo tanto $R_1 = 0$ y $R_2 = 0$

- Son despreciables las pérdidas en el núcleo:

$$P_{\text{HISTÉRESIS}} = 0 \text{ y } P_{\text{EDDY}} = 0$$

- No existe flujo magnético de dispersión por lo tanto:

$$X_1 = 0 \text{ y } X_2 = 0$$

- La permeabilidad del núcleo μ_n es bien alta, por lo cual un valor mínimo de la fmm $I_\phi N_1$ produce el flujo magnético Φ en el núcleo.

De acuerdo a estas consideraciones el transformador ideal se presenta en la Fig.2.8.

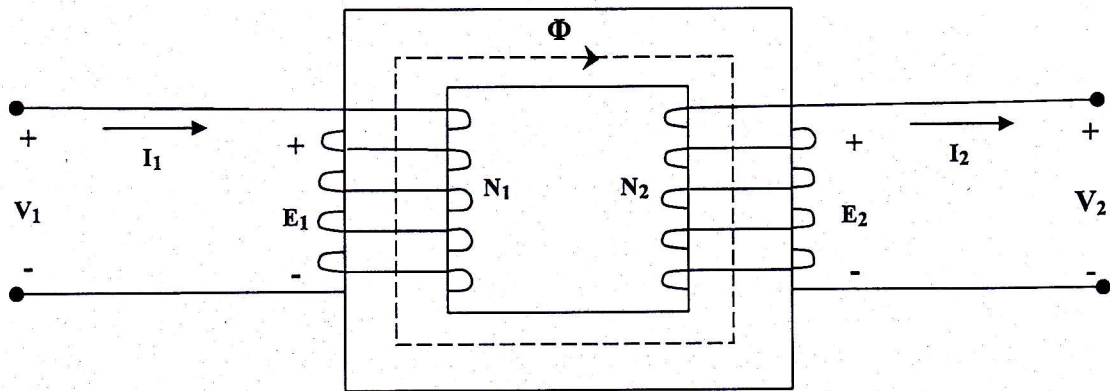


Fig. 2.8 TRANSFORMADOR IDEAL

b. RELACIONES DE TRANSFORMACION DEL TRANSFORMADOR

RELACION DE TRANSFORMACION DE LOS VOLTAJES

De acuerdo al transformador ideal y la ley de Faraday se tiene en los devanados primario y secundario lo siguiente:

$$v_1 = e_1 = N_1 \frac{d\phi}{dt} \quad [2.1]$$

$$v_2 = e_2 = N_2 \frac{d\phi}{dt} \quad [2.2]$$

Al realizar la relación de las expresiones [2.1] y [2.2]:

$$\frac{v_1}{v_2} = \frac{N_1 \frac{d\phi}{dt}}{N_2 \frac{d\phi}{dt}} \quad [2.3]$$

y al utilizar los valores RMS de los voltajes y simplificar la ecuación [2.3] se tiene:

$$\frac{V_1}{V_2} = \frac{N_1}{N_2}$$

que es la relación de transformación de los voltajes.

RELACION DE TRANSFORMACION DE LAS CORRIENTES

La ecuación de las fmm's en el transformador es:

$$I_{\phi}N_1 = I_1N_1 + I_2N_2 \quad [\text{amp-vuelta}]$$

Donde:

$$I_{\phi}N_1 = \text{fmm de excitación} [\text{amp-vuelta}]$$

$$I_1N_1 = \text{fmm del devanado primario} [\text{amp-vuelta}]$$

$$I_2N_2 = \text{fmm del devanado secundario} [\text{amp-vuelta}]$$

Como se asume que la permeabilidad del núcleo μ_n es muy alta, se puede despreciar la fmm de excitación $I_{\phi}N_1$ y se tiene:

$$|I_1N_1| = |I_2N_2|$$

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{N_2}{N_1}$$

que es la relación de transformación de las corrientes.

RELACION DE TRANSFORMACION DE LAS IMPEDANCIAS

De las relaciones de transformación de los voltajes y las corrientes se despeja el voltaje V_1 y la corriente I_1 y se las relaciona en la siguiente expresión:

$$\frac{V_1}{I_1} = \frac{\frac{N_1}{N_2} V_2}{\frac{N_2}{N_1} I_2}$$

Como

$$Z_1 = \frac{V_1}{I_1} \quad \text{y} \quad Z_2 = \frac{V_2}{I_2} \quad \text{se tiene:}$$

$$Z_1 = \left(\frac{N_1}{N_2} \right)^2 Z_2$$

$$\frac{Z_1}{Z_2} = \left(\frac{N_1}{N_2} \right)^2$$

que es la relación de transformación de las impedancias

2.5 CIRCUITO EQUIVALENTE DEL TRANSFORMADOR

El transformador real se presenta en la Fig. 2.9

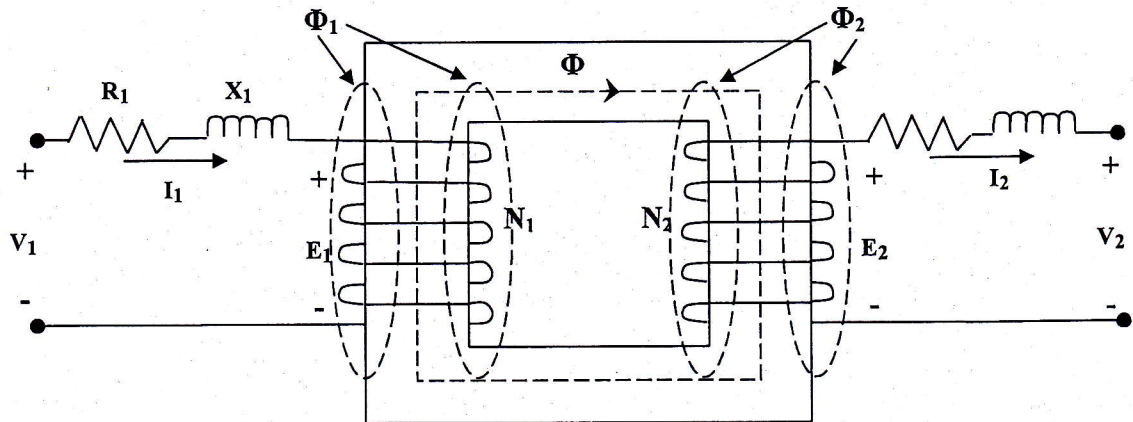


Fig. 2.9 TRANSFORMADOR REAL

El transformador real tiene los siguientes parámetros:

- Las resistencias de los devanados primario y secundario

$$R_1 = \delta \frac{l_1}{A_1} \quad [\text{ohm}]$$

$$R_2 = \delta \frac{l_2}{A_2} \quad [\text{ohm}]$$

Donde:

R_1 = resistencia del devanado primario [ohm]

R_2 = resistencia del devanado secundario [ohm]

δ = resistividad del material de los devanados [ohm - mt]

l_1 = longitud del devanado primario [mt]

A_1 = área del conductor del devanado primario [mt²]

l_2 = longitud del devanado secundario [mt]

A_2 = área del conductor del devanado secundario [mt²]

- Las reactancias de los devanados primario y secundario

La corriente del devanado primario I_1 produce el flujo magnético Φ_1 que enlaza solamente el devanado primario y su trayectoria es en su mayor parte el espacio libre, por lo tanto su característica magnética es lineal y se la presenta en la Fig. 2.10.

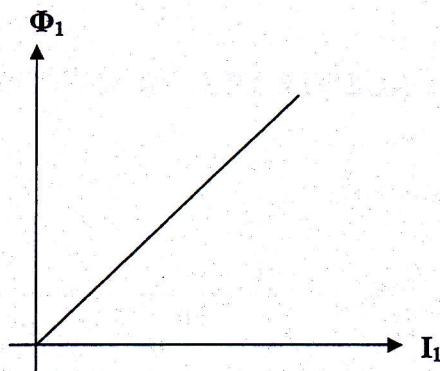


Fig. 2.10 CARACTERISTICA MAGNETICA DE Φ_1

La relación lineal del flujo magnético Φ_1 y la corriente I_1 , define la inductancia L_1 y por lo tanto la reactancia X_1 del devanado primario:

$$L_1 = \frac{N_1 \Phi_1}{I_1}$$

$$X_1 = 2\pi f L_1$$

La corriente del devanado secundario I_2 produce el flujo magnético Φ_2 que enlaza solamente el devanado secundario y su trayectoria es en su mayor parte el espacio libre, por lo tanto su característica magnética es lineal y se la presenta en la Fig. 2.11.

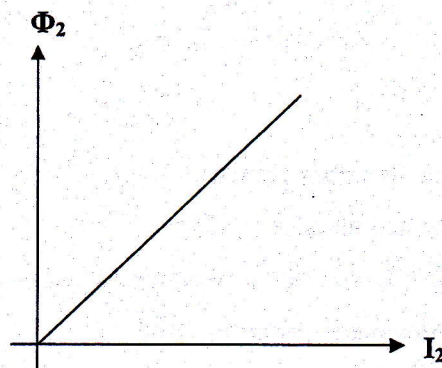


Fig. 2.11 CARACTERISTICA MAGNETICA DE Φ_2

La relación lineal del flujo magnético Φ_2 y la corriente I_2 , define la inductancia L_2 y por lo tanto la reactancia X_2 del devanado secundario:

$$L_2 = \frac{N_2 \Phi_2}{I_2}$$

$$X_2 = 2\pi f L_2$$

- La corriente de excitación I_ϕ tiene las siguientes componentes:

$$I_\phi = I_n + I_m$$

Donde:

I_ϕ = corriente de excitación [amp.]

I_n = corriente que comprende las pérdidas en el núcleo [amp.]

I_m = corriente de magnetización que realmente produce el flujo magnético Φ del núcleo [amp.]

En base al transformador real, los circuitos equivalentes de los devanados primario y secundario se presentan en la Fig. 2.12

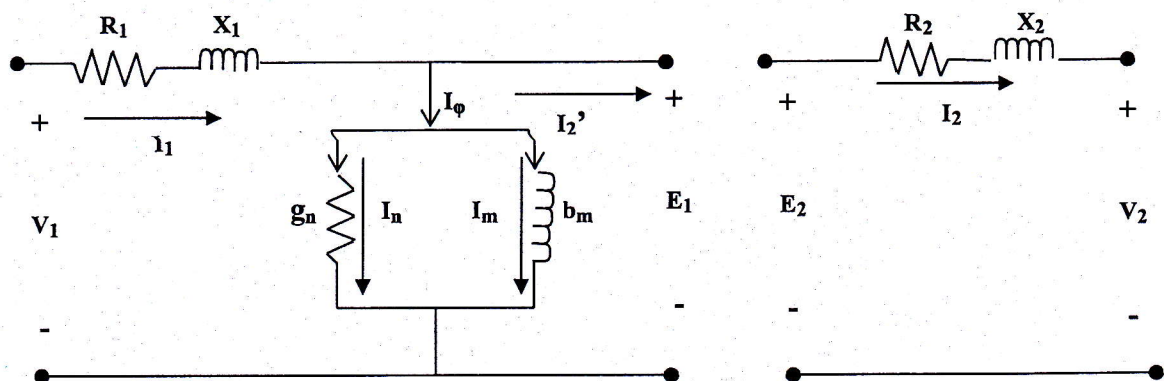


Fig. 2.12 CIRCUITOS EQUIVALENTES DE LOS DEVANADOS PRIMARIO Y SECUNDARIO DEL TRANSFORMADOR

El circuito equivalente del devanado primario está al voltaje V_1 y el circuito equivalente del devanado secundario está al voltaje V_2 .

Con el propósito de tener un solo circuito equivalente del transformador, se tiene que referir los parámetros del circuito equivalente del devanado secundario al primario, para lo cual se utilizan las correspondientes relaciones de transformación:

$$E_2' = E_2 \left(\frac{N_1}{N_2} \right)$$

$$V_2' = V_2 \left(\frac{N_1}{N_2} \right)$$

$$I_2' = I_2 \frac{N_2}{N_1}$$

$$R_2' = R_2 \left(\frac{N_1}{N_2} \right)^2$$

$$X_2' = X_2 \left(\frac{N_1}{N_2} \right)^2$$

El circuito equivalente del transformador se presenta en la Fig. 2.13

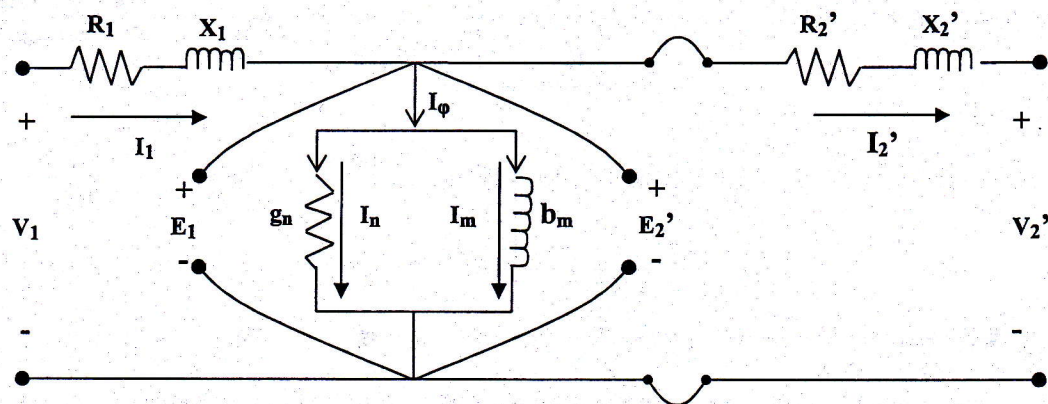


Fig. 2.13 CIRCUITO EQUIVALENTE DEL TRANSFORMADOR

2.6 DIAGRAMA FASORIAL DEL TRANSFORMADOR CON FACTOR DE POTENCIA EN ATRASO

En el diagrama fasorial del transformador con factor de potencia en atraso se considera el diagrama fasorial del transformador real y el diagrama fasorial del circuito equivalente del transformador.

a. DIAGRAMA FASORIAL DEL TRANSFORMADOR REAL

El diagrama del transformador real con carga de factor de potencia en atraso se presenta en la Fig. 2.14

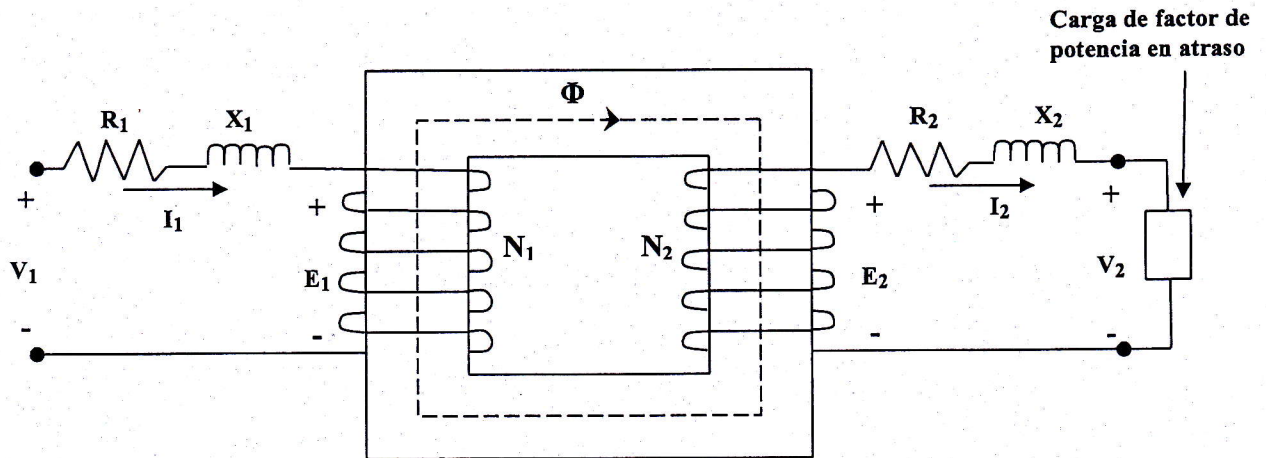


Fig. 2.14 TRANSFORMADOR REAL CON FACTOR DE POTENCIA EN ATRASO

El diagrama fasorial del transformador real con factor de potencia en atraso se presenta en la Fig. 2.15

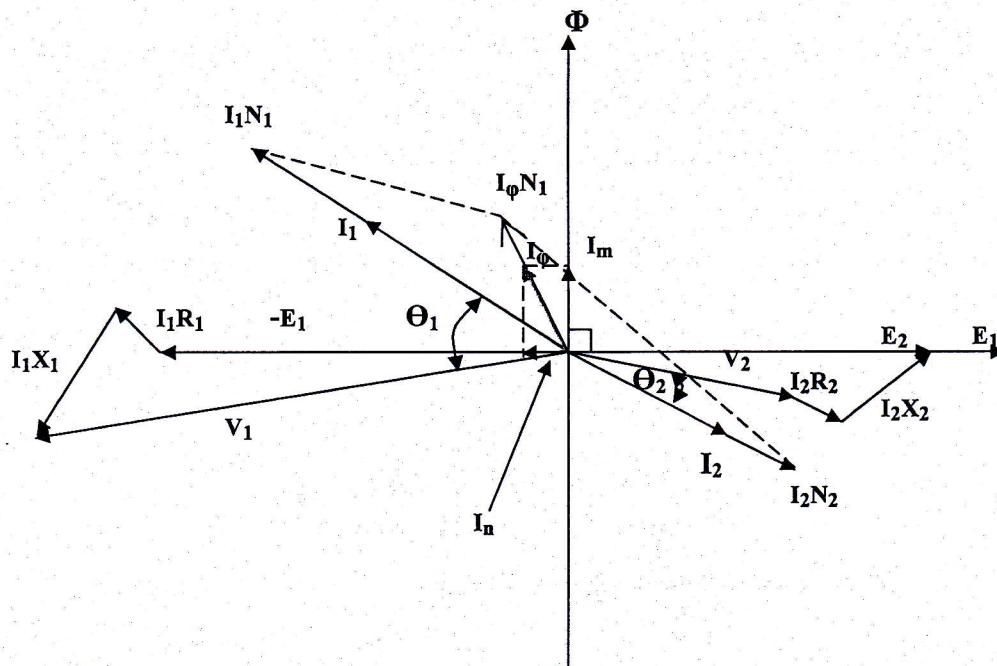


Fig. 2.15 DIAGRAMA FASORIAL DEL TRANSFORMADOR REAL CON FACTOR DE POTENCIA EN ATRASO

Para realizar el diagrama fasorial del transformador real con factor de potencia en atraso se considera lo siguiente:

- Al devanado primario se aplica el voltaje V_1 y a un ángulo θ_1 en atraso se tiene la corriente del devanado primario I_1 que al multiplicar por el número de vueltas N_1 de este devanado se tiene la fmm del primario I_1N_1 .
- La corriente del devanado secundario I_2 que al multiplicar por el número de vueltas N_2 de este devanado se tiene la fmm del secundario I_2N_2 .
- La suma de las fmm I_1N_1 y I_2N_2 es la fmm de excitación $I_\phi N_1$.
- La fmm $I_\phi N_1$ dividida para N_1 se obtiene la corriente excitación I_ϕ , la cual tiene dos componentes, la I_n que comprende las pérdidas en el núcleo y la I_m que es la corriente de magnetización.
- La corriente de magnetización I_m produce el flujo magnético Φ en el núcleo y debido a la Ley de Faraday, noventa grados en atraso, se inducen las fems E_1 y E_2 en los devanados primario y secundario respectivamente.
- El ángulo θ_2 entre el voltaje V_2 y la corriente I_2 corresponde al ángulo de la carga.
- En el circuito del devanado primario se tiene:

$$V_1 = -E_1 + I_1R_1 + jI_1X_1$$

- En el circuito del devanado secundario se tiene:

$$E_2 = V_2 + I_2R_2 + jI_2X_2$$

Para realizar el diagrama fasorial del circuito equivalente del transformador real con factor de potencia en atraso se considera lo siguiente:

- El voltaje del devanado primario V_1 se considera a cero grados y la corriente del devanado primario I_1 atrasa a V_1 en el ángulo θ_1 .
- En el extremo del voltaje V_1 se tiene la caída de tensión en la reactancia del devanado primario $I_1 X_1$ a 90° grados en adelante de la corriente I_1 y la caída de tensión en la resistencia del devanado primario $I_1 R_1$ en fase con la corriente I_1 .
- Las fuerzas electromotrices E_1 y E_2' están en fase y la corriente del núcleo I_n esta en fase con estas fems. La corriente de magnetización I_m esta a 90° en atraso con respecto a las fems E_1 y E_2' .
- La suma de las corrientes I_n y I_m determina la corriente excitación I_ϕ y conociendo la corriente del devanado primario I_1 se determina la corriente del devanado secundario referida al primario I_2' .
- En el extremo de las fems E_1 y E_2 se tiene la caída de tensión en la reactancia del devanado secundario referida al primario $I_2' X_2'$ a 90° grados en adelante de la corriente I_2' y la caída de tensión en la resistencia del devanado secundario referida al primario $I_2' R_2'$ en fase con la corriente I_2' .
- Se determina el voltaje del secundario referido al primario V_2' y el ángulo θ_2 entre esta tensión y la corriente I_2' que corresponde al ángulo de la carga.

2.7 DIAGRAMA FASORIAL DEL TRANSFORMADOR CON FACTOR DE POTENCIA EN ADELANTO

En el diagrama fasorial del transformador con factor de potencia en adelanto se considera el diagrama fasorial del transformador real y el diagrama fasorial del circuito equivalente del transformador.

a. DIAGRAMA FASORIAL DEL TRANSFORMADOR REAL

El diagrama del transformador real con carga de factor de potencia en adelanto se presenta en la Fig. 2.18

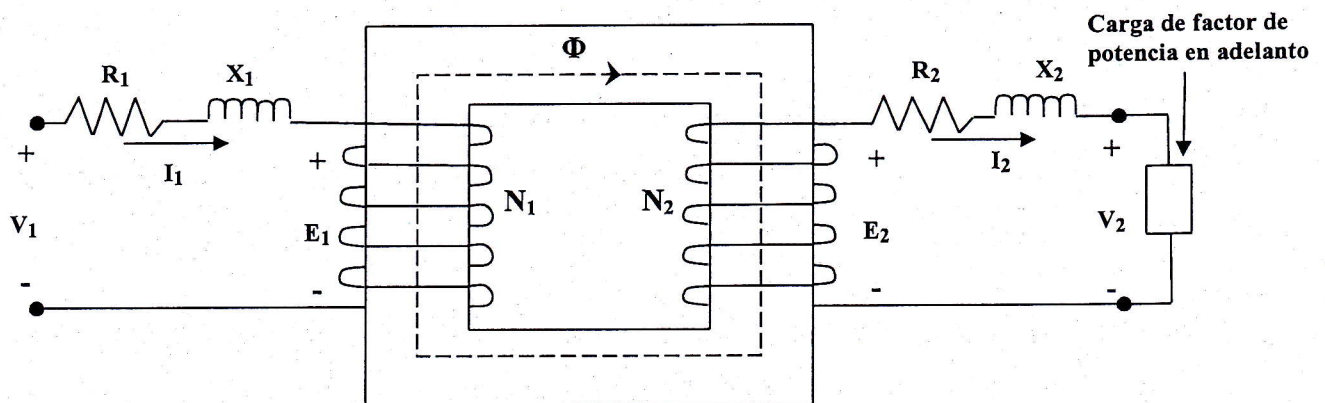


Fig. 2.18 TRANSFORMADOR REAL CON FACTOR DE POTENCIA EN ADELANTO

El diagrama fasorial del transformador real con factor de potencia en adelanto se presenta en la Fig. 2.19

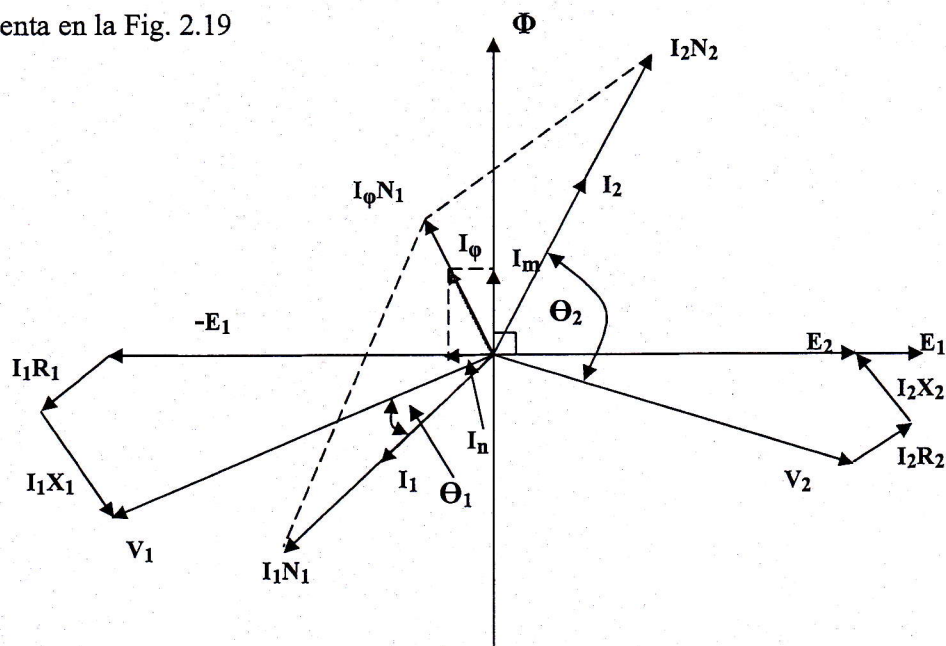


Fig. 2.19 DIAGRAMA FASORIAL DEL TRANSFORMADOR REAL CON FACTOR DE POTENCIA EN ADELANTO

Para realizar el diagrama fasorial del transformador real con factor de potencia en adelanto se considera lo siguiente:

- Al devanado primario se aplica el voltaje V_1 , y a un ángulo θ_1 en adelanto se tiene la corriente del devanado primario I_1 que al multiplicar por el número de vueltas N_1 de este devanado se tiene la fmm del primario I_1N_1 .
- La corriente del devanado secundario I_2 que al multiplicar por el número de vueltas N_2 de este devanado se tiene la fmm del secundario I_2N_2 .
- La suma de las fmm's I_1N_1 y I_2N_2 es la fmm de excitación $I_\phi N_1$.
- La fmm $I_\phi N_1$ dividida para N_1 se obtiene la corriente excitación I_ϕ , la cual tiene dos componentes, la I_n que comprende las pérdidas en el núcleo y la I_m que es la corriente de magnetización.
- La corriente de magnetización I_m produce el flujo magnético Φ en el núcleo y debido a la Ley de Faraday, noventa grados en atraso, se inducen las fems E_1 y E_2 en los devanados primario y secundario respectivamente.
- El ángulo θ_2 entre el voltaje V_2 y la corriente I_2 corresponde al ángulo de la carga.
- En el circuito del devanado primario se tiene:

$$V_1 = -E_1 + I_1R_1 + jI_1X_1$$

- En el circuito del devanado secundario se tiene:

$$E_2 = V_2 + I_2R_2 + jI_2X_2$$

b. DIAGRAMA FASORIAL DEL CIRCUITO EQUIVALENTE

El diagrama del circuito equivalente del transformador con carga de factor de potencia en adelanto se presenta en la Fig. 2.20

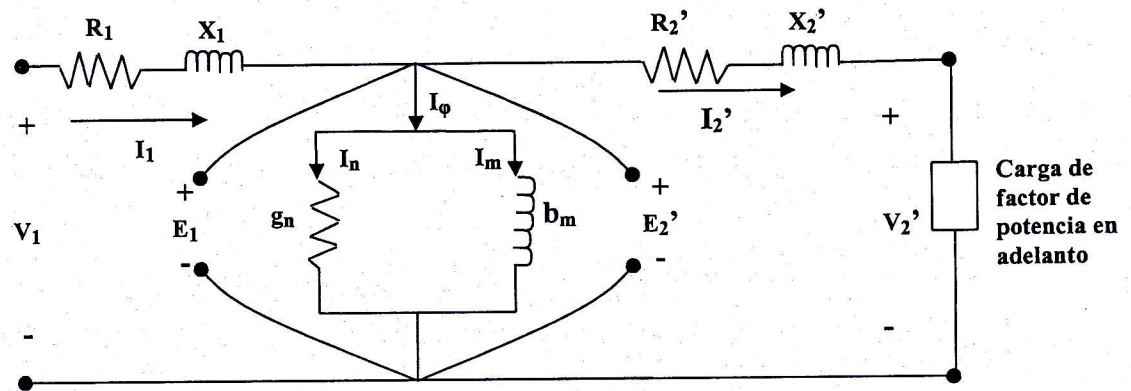


Fig. 2.20 CIRCUITO EQUIVALENTE DEL TRANSFORMADOR CON FACTOR DE POTENCIA EN ADELANTO

El diagrama fasorial del circuito equivalente del transformador con factor de potencia en adelanto se presenta en la Fig. 2.21.

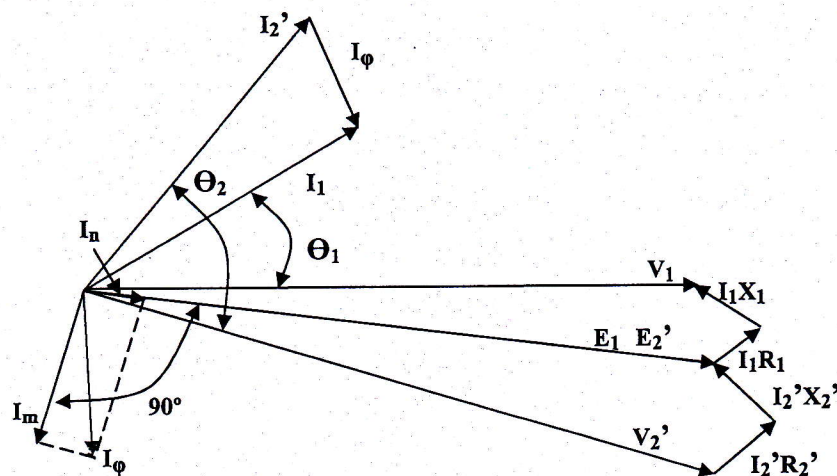


Fig. 2.21 DIAGRAMA FASORIAL DEL CIRCUITO EQUIVALENTE DEL TRANSFORMADOR CON FACTOR DE POTENCIA EN ADELANTO

Para realizar el diagrama fasorial del circuito equivalente del transformador real con factor de potencia en adelanto se considera lo siguiente:

- El voltaje del devanado primario V_1 se considera a cero grados y la corriente del devanado primario I_1 adelanta a V_1 en el ángulo θ_1 .
- En el extremo del voltaje V_1 se tiene la caída de tensión en la reactancia del devanado primario $I_1 X_1$ a 90° grados en adelanto de la corriente I_1 y la caída de tensión en la resistencia del devanado primario $I_1 R_1$ en fase con la corriente I_1 .
- Las fuerzas electromotrices E_1 y E_2' están en fase y la corriente del núcleo I_n esta en fase con estas fems. La corriente de magnetización I_m esta a 90° en atraso con respecto a las fems E_1 y E_2' .
- La suma de las corrientes I_n y I_m determina la corriente excitación I_ϕ y conociendo la corriente del devanado primario I_1 se determina la corriente del devanado secundario referida al primario I_2' .
- En el extremo de las fems E_1 y E_2 se tiene la caída de tensión en la reactancia del devanado secundario referida al primario $I_2' X_2'$ a 90° grados en adelanto de la corriente I_2' y la caída de tensión en la resistencia del devanado secundario referida al primario $I_2' R_2'$ en fase con la corriente I_2' .
- Se determina el voltaje del secundario referido al primario V_2' y el ángulo θ_2 entre esta tensión y la corriente I_2' que corresponde al ángulo de la carga.

2.8 CIRCUITOS APROXIMADOS DEL TRANSFORMADOR

Debido a que en el análisis de los sistemas eléctricos se requiere hacer simplificaciones y de acuerdo a la importancia de los resultados de los estudios, se utilizan los circuitos aproximados del transformador.

Se tiene el circuito equivalente exacto del transformador en la Fig. 2.22

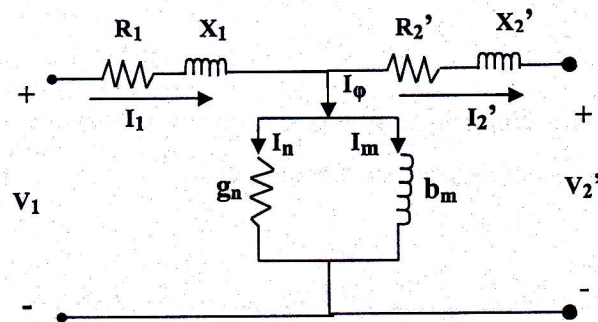


Fig. 2.22 CIRCUITO EQUIVALENTE EXACTO DEL TRANSFORMADOR

Para obtener el primer circuito aproximado del transformador se considera lo siguiente:

$$I_1 (R_1 + j X_1) \ll V_1$$

$$\text{y } I_\phi (R_1 + j X_1) \approx 0.0$$

Por lo cual se traslada la admitancia de excitación a los terminales del primario del transformador y se presenta el primer circuito aproximado del transformador en la Fig. 2.23.

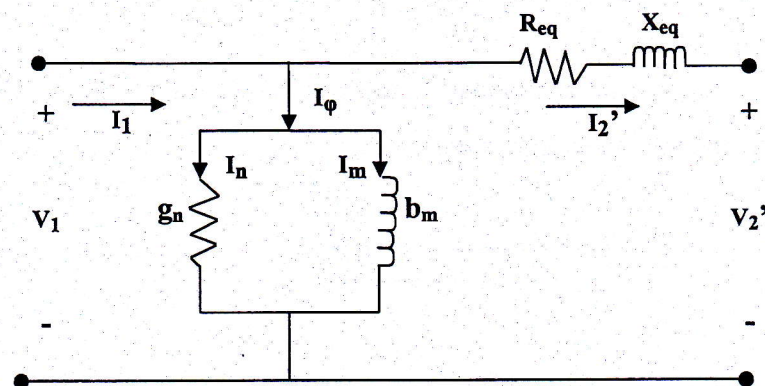


Fig. 2.23 PRIMER CIRCUITO APROXIMADO DEL TRANSFORMADOR

Donde:

$$R_{eq} = R_1 + R_2'$$

$$X_{eq} = X_1 + X_2'$$

El segundo circuito aproximado del transformador se lo obtiene considerando lo siguiente:

$$\begin{aligned} I_{\phi} &\ll I_1 \\ I_{\phi} &\approx 0 \end{aligned}$$

Por lo tanto se procede a eliminar la admitancia de excitación y el segundo circuito aproximado del transformador se presenta en la Fig. 2.24

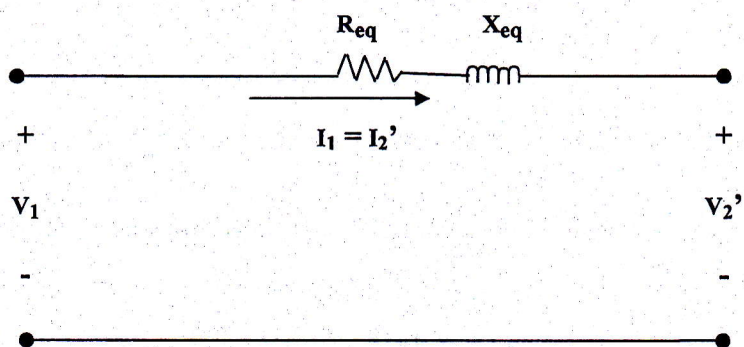


Fig. 2.24 SEGUNDO CIRCUITO APROXIMADO DEL TRANSFORMADOR

El tercer circuito aproximado del transformador se lo obtiene considerando lo siguiente:

$$\begin{aligned} R_{eq} &\ll X_{eq} \\ R_{eq} &\approx 0 \end{aligned}$$

Por lo cual se procede a eliminar la resistencia equivalente R_{eq} y el tercer circuito aproximado del transformador se presenta en la Fig. 2.25

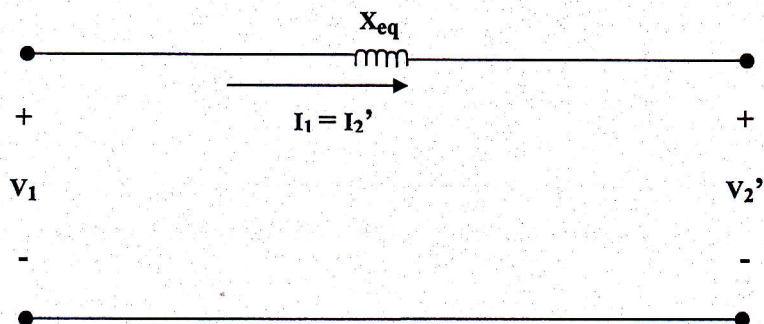


Fig. 2.25 TERCER CIRCUITO APROXIMADO DEL TRANSFORMADOR

2.9 PRUEBAS DE CIRCUITO ABIERTO Y CORTO CIRCUITO DEL TRANSFORMADOR

Las pruebas de circuito abierto y corto circuito del transformador sirven para determinar parámetros fundamentales de los transformadores.

a. PRUEBA DE CIRCUITO ABIERTO

Para realizar la prueba de circuito abierto del transformador se toma como primario el lado de baja tensión y se realiza la prueba con el voltaje nominal. El devanado de alta tensión tiene que estar en circuito abierto.

La prueba de circuito abierto permite determinar la corriente de excitación I_ϕ , las pérdidas en el núcleo P_n y la admitancia de excitación Y_ϕ .

El circuito eléctrico para realizar la prueba de circuito abierto del transformador se presenta en la Fig. 2.26

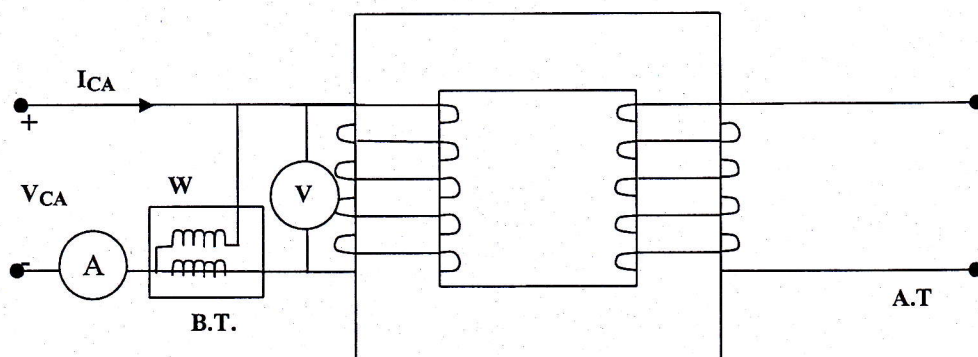


Fig. 2.26 CIRCUITO ELECTRICO DE LA PRUEBA DE CIRCUITO ABIERTO DEL TRANSFORMADOR

En la prueba de circuito abierto del transformador se tienen que medir voltaje, corriente y potencia activa en el lado de baja tensión del transformador, por lo cual se tienen que instalar un voltímetro, un amperímetro y un vatímetro.

El voltímetro V mide el voltaje de la prueba de circuito abierto V_{AC} que es igual al voltaje nominal de baja tensión $(V_{BT})_n$

El amperímetro A mide la corriente de la prueba de circuito abierto I_{CA} que es igual a la corriente de excitación I_{ϕ} .

El vatímetro W mide la potencia activa de la prueba de circuito abierto P_{CA} que es igual a las pérdidas del núcleo P_n del transformador.

El circuito equivalente del transformador en la prueba de circuito abierto se presenta en la Fig. 2.27.

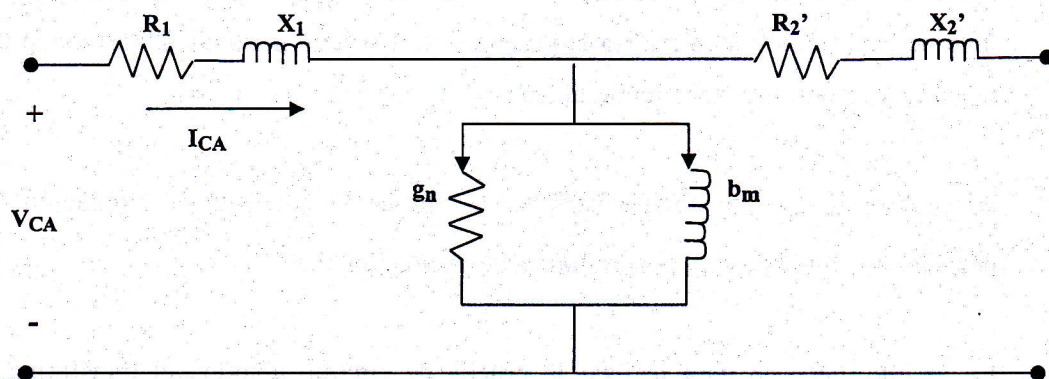


Fig. 2.27 CIRCUITO EQUIVALENTE DEL TRANSFORMADOR EN LA PRUEBA DE CIRCUITO ABIERTO

En la prueba de circuito abierto del transformador se considera lo siguiente:

$$I_{CA} (R_1 + j X_1) \ll V_1$$

Por lo tanto:

$$I_{CA} (R_1 + j X_1) \approx 0.0$$

$$\text{y } I_{CA}^2 R_1 \approx 0.0$$

Bajo las consideraciones indicadas el circuito aproximado del transformador en la prueba de circuito abierto se presenta en la Fig. 2.28.

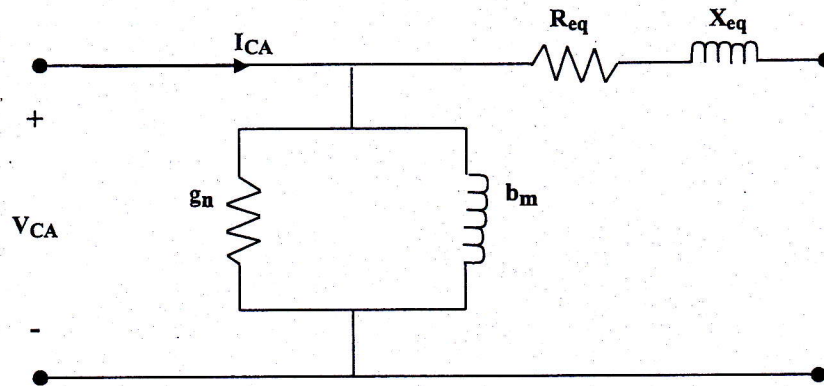


Fig. 2.28 CIRCUITO APROXIMADO DEL TRANSFORMADOR EN LA PRUEBA DE CIRCUITO ABIERTO

La admitancia de excitación es:

$$Y_{\phi} = \frac{I_{CA}}{V_{CA}}$$

La conductancia es:

$$P_{CA} = V_{CA}^2 g_n$$

$$g_n = \frac{P_{CA}}{V_{CA}^2}$$

La suceptancia es:

$$b_m = \sqrt{Y_{\phi}^2 - g_n^2}$$

b. PRUEBA DE CORTOCIRCUITO

Para realizar la prueba de cortocircuito del transformador se toma como primario el lado de alta tensión porque se la efectúa con corriente nominal. El devanado de baja tensión tiene que estar en cortocircuito.

La prueba de cortocircuito permite determinar las impedancias de dispersión de los devanados primario y secundario del transformador Z_1 y Z_2 .

El circuito eléctrico para realizar la prueba de cortocircuito del transformador se presenta en la Fig. 2.29.

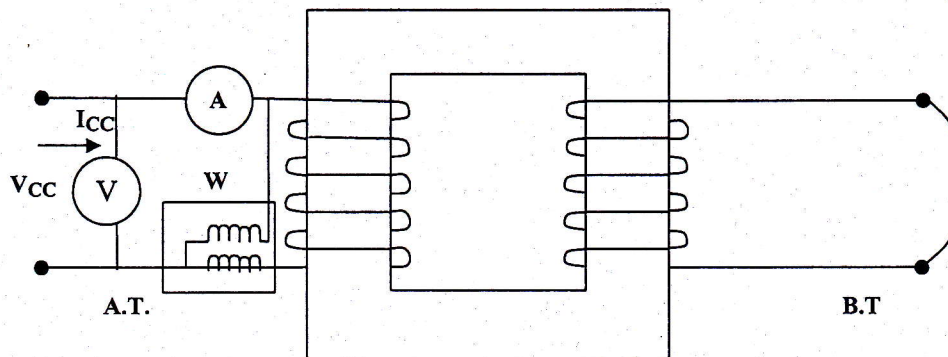


Fig. 2.29 CIRCUITO ELECTRICO DE LA PRUEBA DE CORTOCIRCUITO DEL TRANSFORMADOR

En la prueba de cortocircuito del transformador se tienen que medir voltaje, corriente y potencia activa en el lado de alta tensión del transformador, por lo cual se tienen que instalar un voltímetro, un amperímetro y un vatímetro.

El voltímetro V mide el voltaje de la prueba de cortocircuito V_{CC} que es bastante menor que el voltaje nominal de alta tensión $(V_{AT})_n$.

El amperímetro A mide la corriente de la prueba de cortocircuito I_{CC} que es igual a la corriente nominal de alta tensión $(I_{AT})_n$.

El vatímetro W mide la potencia activa de la prueba de cortocircuito P_{CC} que es igual a las pérdidas de cobre del transformador.

El circuito equivalente del transformador en la prueba de cortocircuito se presenta en la Fig. 2.30.

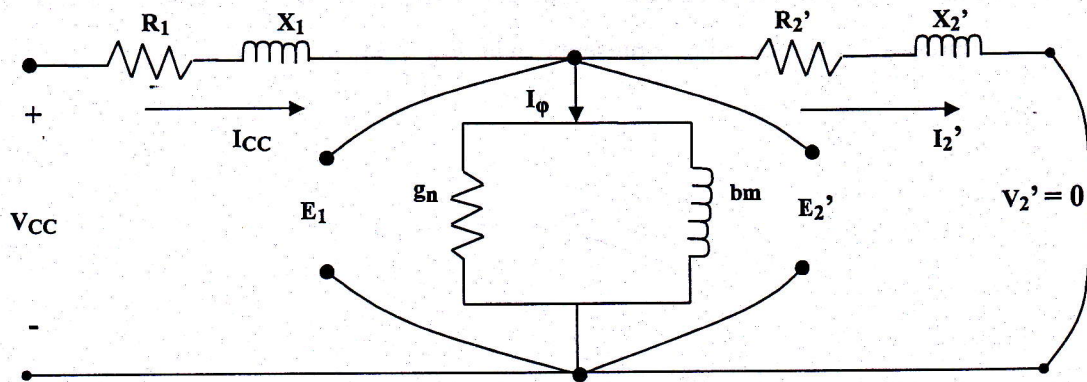


Fig. 2.30 CIRCUITO EQUIVALENTE DEL TRANSFORMADOR EN LA PRUEBA DE CORTOCIRCUITO

En operación normal del transformador se tiene:

$$(E_2')_{on} = V_2' + I_2' (R_2' + jX_2')$$

En la prueba de cortocircuito del transformador se tiene:

$$(E_2')_{cc} = I_2' (R_2' + jX_2') \quad y \quad V_2' = 0$$

Por lo tanto:

$$(E_2')_{on} \gg (E_2')_{cc}$$

La fuerza electromotriz del devanado secundario referido al primario es:

$$E_2' = E_1 = 4,44 f N_1 \Phi_{m\acute{a}x}$$

El valor de la fem E_1 depende del valor máximo del flujo magnético φ :

$$\varphi = \Phi_{m\acute{a}x} \sin \omega t$$

En la prueba de cortocircuito para que el valor de la fem E_1 sea pequeño, el flujo magnético ϕ tiene que ser pequeño y por ende la corriente de excitación i_ϕ . El flujo magnético del núcleo ϕ , en función de la corriente de excitación i_ϕ del transformador en la prueba de cortocircuito se presenta en la Fig. 2.31.

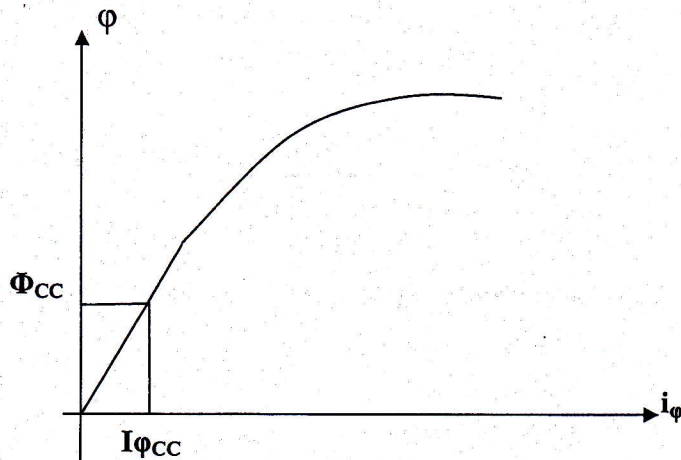


Fig. 2.31 FLUJO MAGNETICO EN FUNCION DE LA CORRIENTE DE EXCITACION DEL TRANSFORMADOR EN LA PRUEBA DE CORTOCIRCUITO

De acuerdo al gráfico de la Fig. 2.31 el valor de la corriente excitación es muy pequeño y por lo tanto:

$$I_\phi \approx 0.0$$

$$\text{y } P_n \approx 0.0$$

Bajo las consideraciones indicadas el circuito aproximado del transformador en la prueba de cortocircuito se presenta en la Fig. 2.32

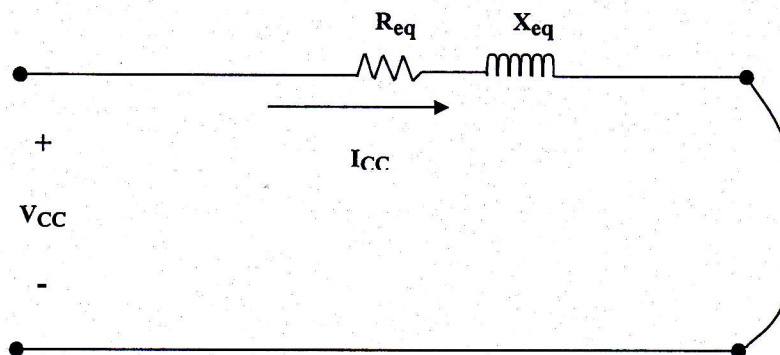


Fig. 2.32 CIRCUITO APROXIMADO DEL TRANSFORMADOR EN LA PRUEBA DE CORTOCIRCUITO

La impedancia equivalente es:

$$Z_{eq} = \frac{V_{CC}}{I_{CC}}$$

La resistencia equivalente es:

$$P_{CC} = I_{CC}^2 R_{eq}$$

$$R_{eq} = \frac{P_{CC}}{I_{CC}^2}$$

La reactancia equivalente es:

$$X_{eq} = \sqrt{Z_{eq}^2 - R_{eq}^2}$$

Con el propósito de obtener las resistencias y las reactancias de cada devanado del transformador se tiene:

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

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

2.10 REGULACION DE TENSION DEL TRANSFORMADOR

La regulación de tensión del transformador es una característica técnica importante de esta máquina eléctrica.

El voltaje de servicio de las cargas tiene que variar entre el $\pm 5\%$ con respecto a los voltajes de placa de los equipos eléctricos.

En la Fig. 2.33 se presenta un transformador que tiene tres cargas: luminarias, un equipo eléctrico y un motor.

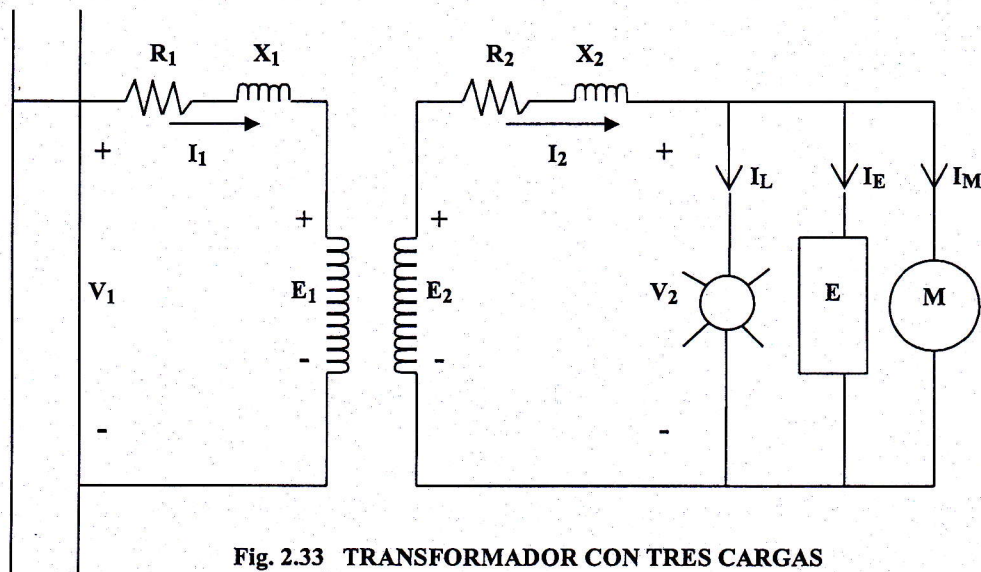


Fig. 2.33 TRANSFORMADOR CON TRES CARGAS

En el transformador de la Fig. 2.33 se considera que el voltaje del primario V_1 es fijo y el voltaje del secundario V_2 varía de acuerdo a la cargabilidad del transformador y en consecuencia a las caídas de tensión en las impedancias de dispersión de los devanados primario y secundario:

$$I_1(R_1 + j.X_1)$$

$$\text{y } I_2(R_2 + j.X_2)$$

Para calcular la regulación de tensión del transformador se utiliza el circuito aproximado de la Fig. 2.34:

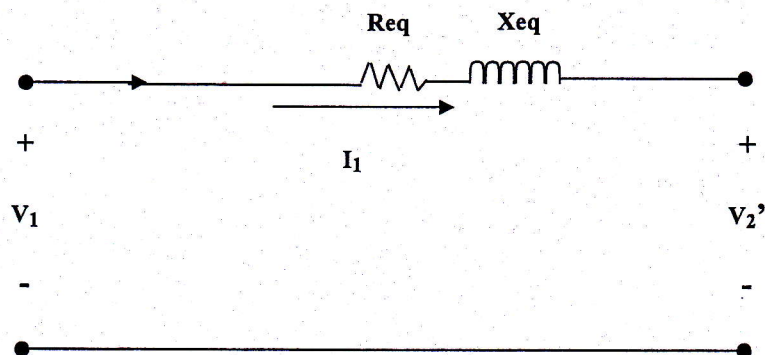


Fig. 2.34 CIRCUITO APROXIMADO DEL TRANSFORMADOR

La regulación de tensión del transformador se define por la siguiente expresión:

$$\% \text{Regulación} = \frac{|V_1| - |V_2'|}{|V_2'|} \times 100\%$$

Donde: $|V_1|$ = magnitud del voltaje del devanado primario o voltaje en vacío visto desde el secundario referido al primario

$|V_2'|$ = magnitud del voltaje del devanado secundario referido al primario.

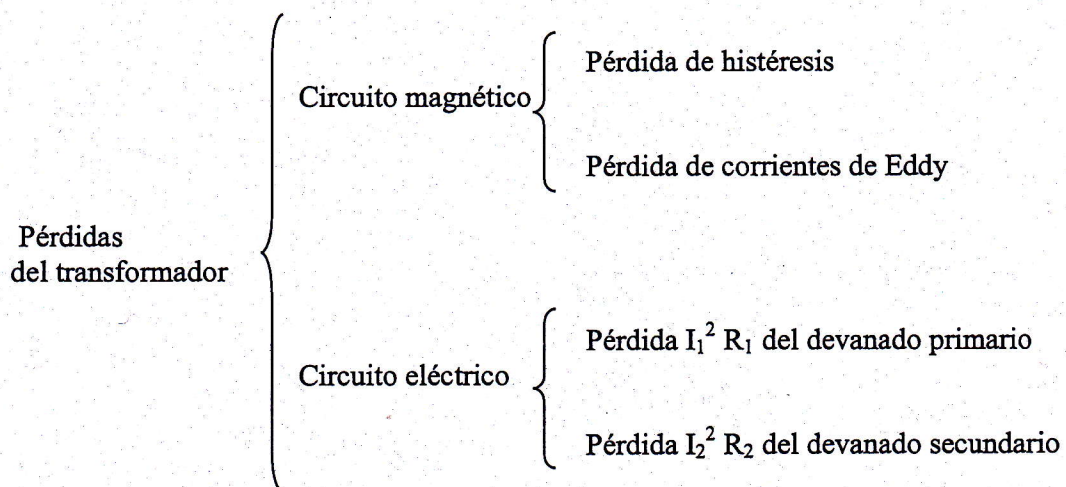
2.11 RENDIMIENTO DEL TRANSFORMADOR

El rendimiento del transformador es una característica técnica importante de esta máquina eléctrica y es:

$$\eta = \frac{\text{Pot}_{\text{Salida}}}{\text{Pot}_{\text{Entrada}}}$$

$$\eta = \frac{\text{Pot}_{\text{Salida}}}{\text{Pot}_{\text{salida}} + \text{Pérdidas}}$$

Las pérdidas del transformador son las siguientes:



a. PERDIDA DE HISTERESIS

El transformador energizado y en vacío se presenta en la Fig. 2.35

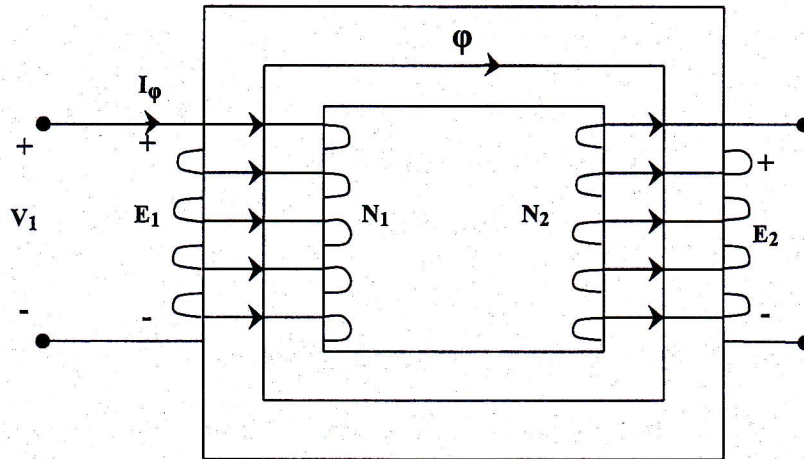


Fig. 2.35 TRANSFORMADOR EN VACIO

La corriente de excitación I_ϕ es la que produce el flujo magnético ϕ en el núcleo y es:

$$\phi = \phi_{\max} \sin(\omega t)$$

El diagrama del flujo magnético ϕ vs. ωt y del flujo magnético ϕ en función de la fuerza magnetomotriz F se presenta en la Fig. 2.36

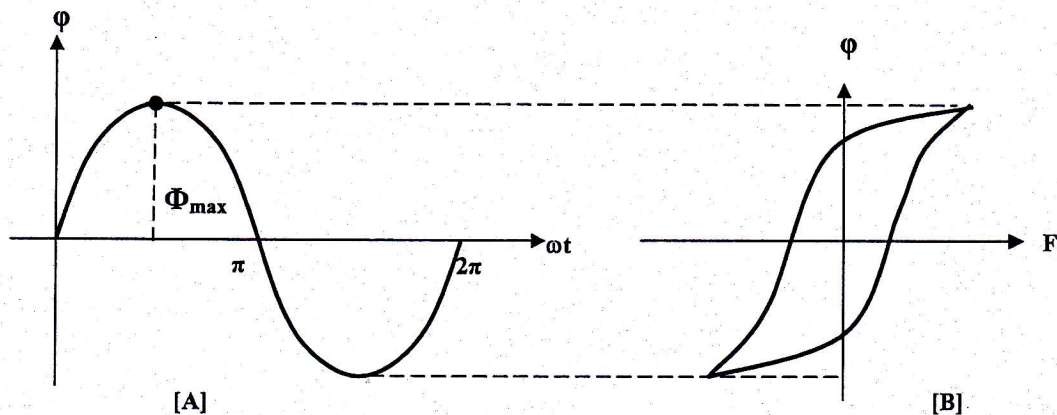


Fig. 2.36 [A] FLUJO MAGNETICO ϕ
[B] CURVA DE HISTERESIS

La integral de la curva de histéresis da la pérdida de histéresis. Pero esta forma de calcular la pérdida de histéresis es tediosa, normalmente se utilizan ecuaciones empíricas que se basan en la experiencia del diseño y construcción de maquinaria eléctrica que dan resultados muy aproximados a los reales.

La ecuación empírica para determinar la pérdida de histéresis es la siguiente:

$$P_H = K_H f B^2 V$$

Donde:

P_H = pérdida de histéresis [w]

K_H = constante del material

f = frecuencia [cps]

B = densidad de campo magnético [weber/mt²]

V = volumen del núcleo [mt³]

b. PERDIDA DE CORRIENTES DE EDDDY

Un segmento del núcleo y el devanado primario del transformador se presentan en la Fig 2.37

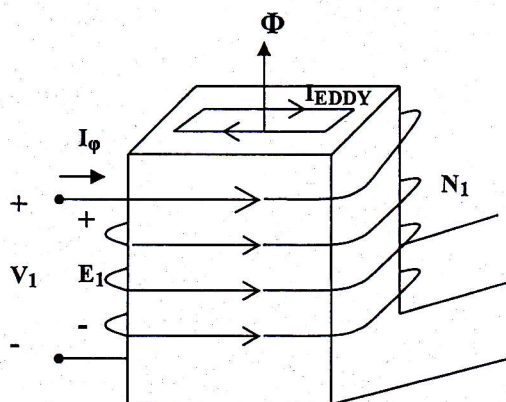


Fig. 2.37 SEGMENTO DEL NÚCLEO Y DEVANADO PRIMARIO DEL TRANSFORMADOR

La corriente de excitación I_ϕ del devanado primario produce el flujo magnético Φ .

De acuerdo a la Ley de Faraday, el flujo magnético Φ induce una fuerza electromotriz en el núcleo del transformador, la cual produce la corriente de Eddy. La corriente de

Eddy tiene un efecto desmagnetizante con respecto al flujo magnético Φ que ha inducido la fuerza electromotriz.

La corriente de Eddy al cuadrado y multiplicada por la resistencia de su circuito da la pérdida de corrientes de Eddy.

Para disminuir la pérdida de corrientes de Eddy, el núcleo no se lo construye de una sola pieza sólida sino que esta formado por la unión de una serie de láminas de acero magnético y entre cada lámina hay una película de aislamiento eléctrico. El corte del núcleo del transformador se presenta en la Fig. 2.38

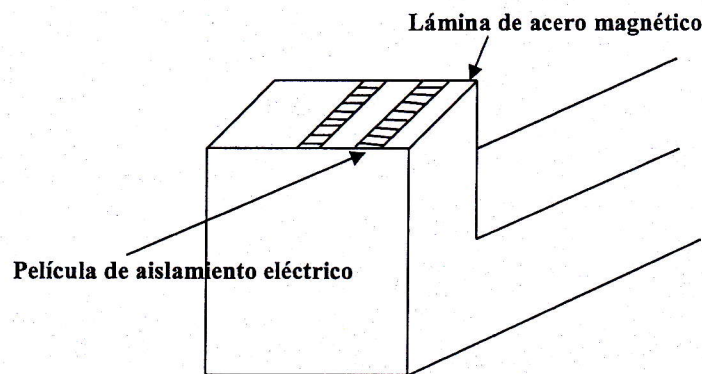


Fig. 2.38 CORTE DEL NUCLEO DEL TRANSFORMADOR

Calcular la pérdida de corrientes de Eddy determinando estas corrientes y las resistencias eléctricas del núcleo es muy tedioso, normalmente se utilizan ecuaciones empíricas que se basan en la experiencia del diseño y construcción de maquinaria eléctrica, que dan resultados muy aproximados a los reales.

La ecuación empírica para determinar la pérdida de corrientes de Eddy es la siguiente:

$$P_E = K_E (tfB)^2 V$$

Donde:

P_E = pérdida de corrientes de Eddy [w]

K_E = constante del material

t = grosor de la lámina de acero magnético [mt]

f = frecuencia [cps]

B = densidad de campo magnético [weber/mt²]

$V =$ volumen del núcleo $[\text{m}^3]$

c. PERDIDAS DE COBRE

Las pérdidas de cobre de los devanados primario y secundario del transformador son:
 $I_1^2 R_1$ y $I_2^2 R_2$.

d. INCIDENCIA DE LAS PERDIDAS EN EL RENDIMIENTO

Las pérdidas en el núcleo no tiene incidencia en el rendimiento del transformador, en cambio las pérdidas de cobre son en función de la carga.

El rendimiento del transformador es:

$$\eta = \frac{P_{\text{salida}}}{P_{\text{sal}} + \text{Pérdidas}}$$

Reemplazando las ecuaciones de la potencia de salida y las pérdidas se tiene:

$$\eta = \frac{V_2 I_2 \cos \theta_2}{V_2 I_2 \cos \theta_2 + P_H + P_E + I_1^2 R_1 + I_2^2 R_2}$$

Refiriendo los parámetros de la pérdida del devanado primario al secundario se tiene:

$$\eta = \frac{V_2 I_2 \cos \theta_2}{V_2 I_2 \cos \theta_2 + P_H + P_E + \underbrace{I_1^2 \left(\frac{N_1}{N_2} \right)^2}_{(I_1')^2} \underbrace{R_1 \left(\frac{N_2}{N_1} \right)^2}_{R_1'} + I_2^2 R_2}$$

$$\eta = \frac{V_2 I_2 \cos \theta_2}{V_2 I_2 \cos \theta_2 + P_H + P_E + (I_1')^2 R_1' + I_2^2 R_2}$$

Como:

$$I_1' = I_2$$

El rendimiento del transformador es:

$$\eta = \frac{V_2 I_2 \cos \theta_2}{V_2 I_2 \cos \theta_2 + P_H + P_E + I_2^2 (R_2 + R_1')}$$

Las pérdidas en el núcleo no varían, sea que el transformador este en vacío o a plena carga, entonces el rendimiento del transformador es función de la corriente del secundario, la cual depende de la carga.

2.12 POLARIDAD DEL TRANSFORMADOR

La polaridad del transformador es necesario conocerla para realizar las siguientes conexiones:

- Los devanados de un mismo transformador en serie o paralelo.
- Dos o más transformadores en paralelo
- Transformadores monofásicos en bancos trifásicos.

Con el propósito de determinar la polaridad del transformador se designan los terminales de los devanados de la siguiente manera:

- Los terminales del devanado de Alta Tensión se designan con la letra H, y cada terminal tiene el subíndice 1, 2, 3, etc.
- Los terminales del devanado de Baja Tensión se designan con la letra X y cada terminal tiene el subíndice 1, 2, 3, etc.

En la Fig. 2.39 se presenta el transformador con las polaridades de sus devanados de alta tensión A.T. y baja tensión B.T.

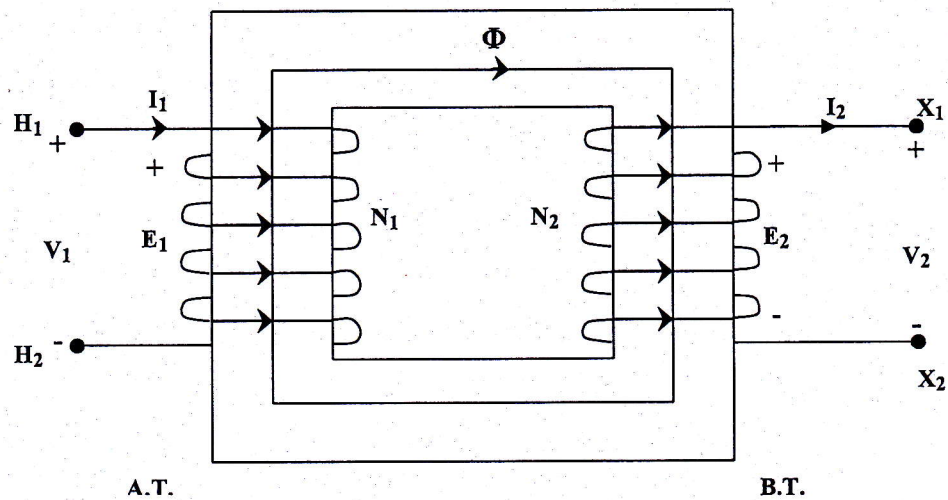


Fig. 2.39 POLARIDAD DEL TRANSFORMADOR

El devanado primario es de alta tensión y el terminal H_1 es por donde entra la corriente I_1 y el otro terminal es H_2 . El devanado secundario es de baja tensión y el terminal X_1 es por donde sale la corriente I_2 y el otro terminal es X_2 .

Para determinar la polaridad del transformador se realiza una prueba, el diagrama eléctrico de esta prueba se presenta en la Fig. 2.40

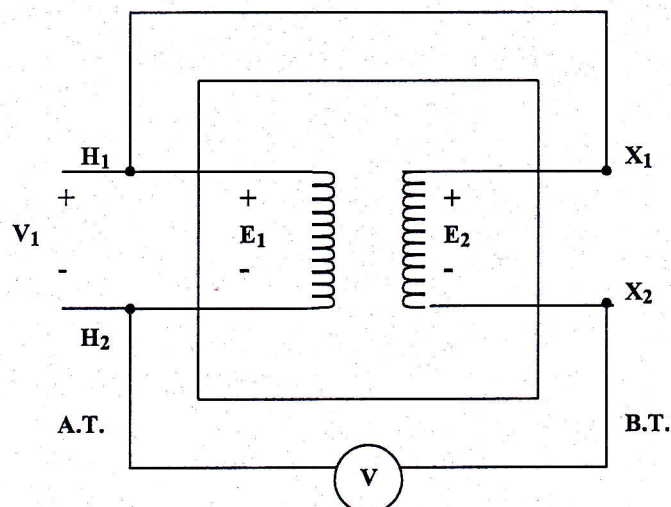


Fig. 2.40 PRUEBA DE LA POLARIDAD DEL TRANSFORMADOR

La prueba consiste en conectar los devanados de alta tensión y baja tensión en serie, y se tiene que aplicar un voltaje V_1 al devanado de alta tensión de tal manera que su magnitud es:

$$V_1 \ll (V_{A.T})_n$$

y se conecta un voltímetro V en la conexión en serie de los devanados. La polaridad del transformador se determina de la siguiente manera:

- La polaridad del devanado de alta tensión se determina por la polaridad del voltaje aplicado V_1 .
- La polaridad del devanado de baja tensión se determina por la magnitud del voltaje del voltímetro V

Si la lectura del voltímetro es:

$$V < V_1 \quad \text{El transformador tiene polaridad substractiva}$$

Si la lectura del voltímetro es:

$$V > V_1 \quad \text{El transformador tiene polaridad aditiva}$$

2.13 TRANSFORMADOR TRIFASICO

El transformador trifásico es tipo núcleo y para estudiar su construcción se consideran tres transformadores monofásicos tipo núcleo conectados a las fases A, B y C de un sistema trifásico. Estos transformadores se presentan en la Fig. 2.41

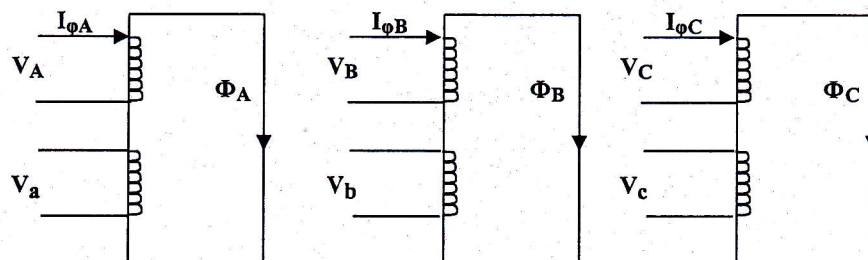


Fig. 2.41 TRES TRANSFORMADORES MONOFASICOS TIPO NUCLEO

Si los voltajes de alimentación V_A , V_B , V_C a cada transformador monofásico son simétricos, los flujos magnéticos Φ_A , Φ_B , Φ_C de cada transformador monofásico también son simétricos es decir:

$$V_A + V_B + V_C = 0$$

y

$$\Phi_A + \Phi_B + \Phi_C = 0$$

La unión de los transformadores monofásicos para obtener el transformador trifásico se presenta en la Fig. 2.42:

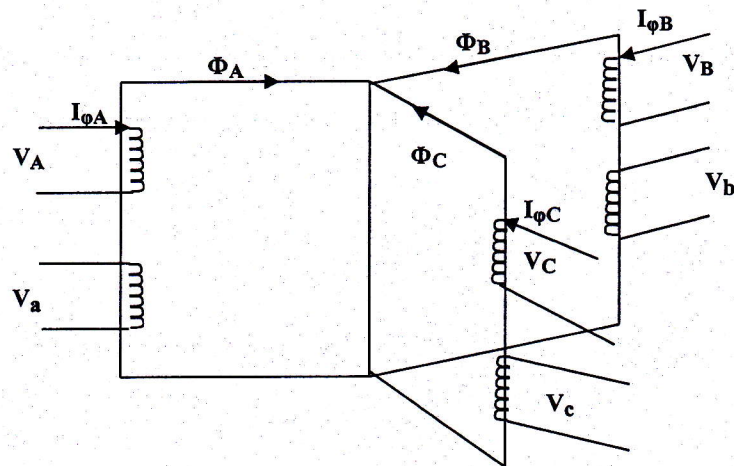


Fig. 2.42 FORMACION DEL TRANSFORMADOR TRIFASICO

Como la suma de los flujos magnéticos $\Phi_A + \Phi_B + \Phi_C$ es cero, no es necesario la columna del núcleo donde se asumiría que fluye el flujo magnético total.

Por lo tanto el transformador trifásico tipo núcleo esta constituido por tres columnas que corresponden a los devanados de las fases A, B y C y se lo presenta en la Fig. 2.43

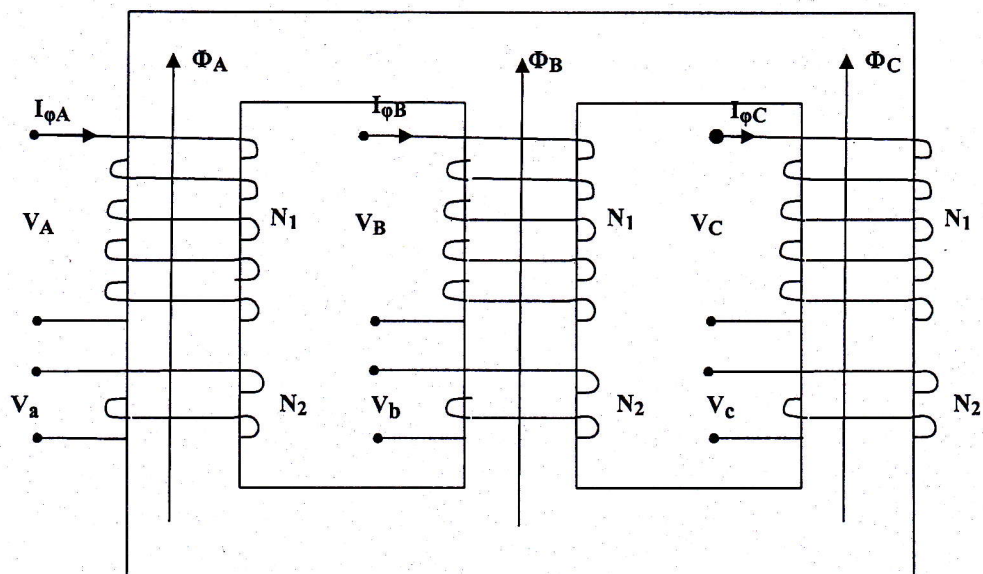


Fig. 2.43 TRANSFORMADOR TRIFASICO

2.13 AUTOTRANSFORMADOR

El autotransformador utiliza un solo devanado y parte de ese devanado es común tanto para el primario como para el secundario

El autotransformador reductor se presenta en la Fig. 2.44

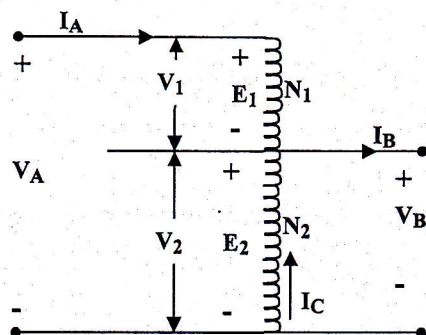


Fig. 2.44 AUTOTRANSFORMADOR REDUCTOR

El devanado tiene $N_1 + N_2$ vueltas, N_1 corresponde al número de vueltas de la parte del devanado que no es común y N_2 corresponde al número de vueltas de la parte del devanado que es común tanto para el primario como para el secundario.

En el primario se tienen el voltaje de alta tensión V_A , los voltajes terminales V_1 y V_2 y la corriente I_A .

En la parte del devanado que no es común se tiene la fem E_1 y en la parte del devanado que es común se tiene la fem E_2 y la corriente I_C .

En el secundario se tienen el voltaje de baja tensión V_B y la corriente I_B

RELACIONES DE TRANSFORMACION

Para obtener la relación de transformación de los voltajes se tiene la relación de las fems:

$$\frac{E_1}{E_2} = \frac{N_1}{N_2}$$

La fem desde alta tensión es:

$$E_A = E_1 + E_2$$

$$E_A = E_2 \frac{N_1}{N_2} + E_2$$

$$E_A = \left(\frac{N_1}{N_2} + 1 \right) E_2$$

$$E_A = \left(\frac{N_1 + N_2}{N_2} \right) E_2$$

Como:

$$E_2 = E_B$$

$$\frac{E_A}{E_B} = \frac{N_1 + N_2}{N_2}$$

La relación de transformación de los voltajes es:

$$\frac{V_A}{V_B} = \frac{N_1 + N_2}{N_2}$$

Para obtener la relación de transformación de las corrientes se tiene que asumir el autotransformador en condiciones ideales, para lo cual se considera que las pérdidas activas y reactivas del autotransformador tienen que ser cero, es decir:

Pérdida activa de la parte del devanado que no es común $I_A^2 R_1 = 0$.

Pérdida activa de la parte del devanado común $I_C^2 R_2 = 0$.

Pérdida activa en el núcleo $P_n = 0$.

Pérdida reactiva de la parte del devanado que no es común $I_A^2 X_1 = 0$.

Pérdida reactiva de la parte del devanado común $I_C^2 X_2 = 0$.

En base de lo anterior se tiene:

$$V_A I_A = V_B I_B$$

$$\frac{V_A}{V_B} = \frac{I_B}{I_A}$$

Como:

$$\frac{V_A}{V_B} = \frac{N_1 + N_2}{N_2}$$

La relación de transformación de las corrientes es:

$$\frac{I_A}{I_B} = \frac{N_2}{N_1 + N_2}$$

POTENCIA EN EL SECUNDARIO

La potencia aparente en el secundario es:

$$S_B = V_B I_B$$

La corriente en el secundario es:

$$I_B = I_A + I_C$$

Por lo tanto la potencia aparente en el secundario es:

$$S_B = V_B (I_A + I_C) = V_B I_A + V_B I_C$$

Es decir la potencia aparente en el secundario tiene dos componentes:

$V_B I_A$, corresponde a los voltios amperios transferidos conductivamente por el devanado no común de N_1 vueltas.

$V_B I_C$, corresponde a los voltios amperios transferidos por la acción del transformador por el devanado común de N_2 vueltas.

TEORIA Y PROBLEMAS DE APLICACION DE LOS TRANSFORMADORES

CAPITULO III

CONEXIONES DE LOS TRANSFORMADORES

3.1 CONEXIONES DEL TRANSFORMADOR MONOFASICO.

En el transformador monofásico de distribución, por lo general, el devanado del primario es de alta tensión y el devanado del secundario es de baja tensión. El devanado del primario de alta tensión es uno solo y el secundario de baja tensión está dividido en dos partes. En la Fig. 3.1 se presenta el transformador monofásico de distribución para el sistema de distribución de 13.2 KV.

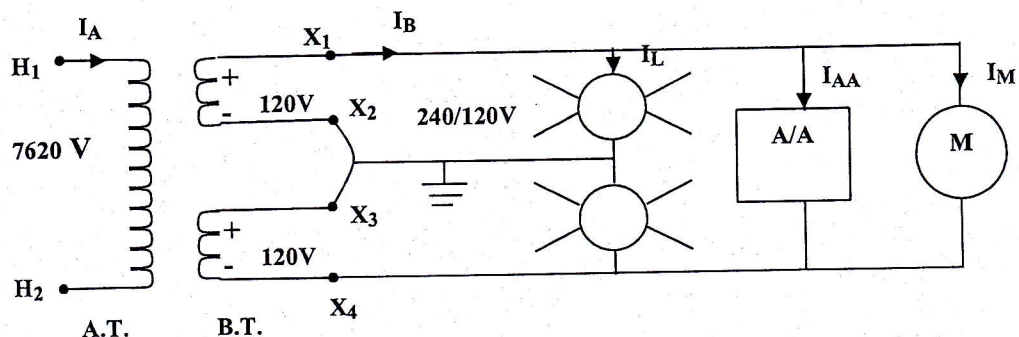


Fig. 3.1 TRANSFORMADOR MONOFASICO

En el transformador monofásico de la Fig. 3.1 el devanado del primario es de alta tensión, tiene un voltaje de 7620 voltios y la polaridad de sus terminales es $H_1 - H_2$. El devanado del secundario es de baja tensión, tiene los voltajes de 120 y 240 voltios y la polaridad de sus terminales es $X_1 - X_2 - X_3 - X_4$, teniendo los terminales X_2 y X_3 puenteados.

En el lado de baja tensión se conectan las siguientes cargas:

120 V: carga de iluminación repartida por igual en los dos circuitos.

240 V: carga de aire acondicionado y un motor eléctrico.

En el caso que se requiera solamente el voltaje de 120 V, la conexión del transformador se presenta en la figura 3.2

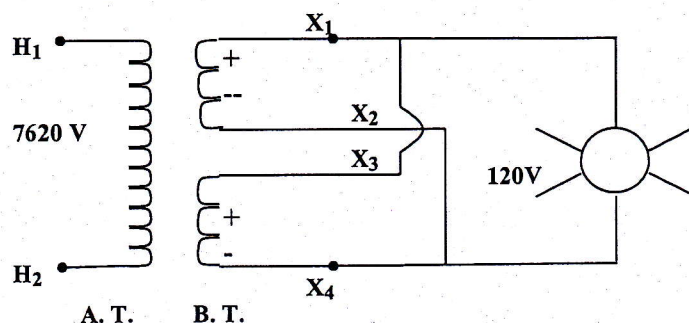


Fig. 3.2 TRANSFORMADOR MONOFASICO

En el transformador monofásico de la Fig.3.2 el devanado del primario es de alta tensión y tiene un voltaje de 7620 V. El devanado del secundario es de baja tensión y está conectado en paralelo para obtener solamente 120 V.

3.2 CONEXION DE TRANSFORMADORES MONOFASICOS EN PARALELO

Para conectar dos o más transformadores monofásicos en paralelo tienen que ser de igual relación de transformación.

Para verificar que la conexión en paralelo de dos transformadores monofásicos T' y T'' es correcta, se conecta un voltímetro V en la conexión de baja tensión como se presenta en la Fig. 3.3

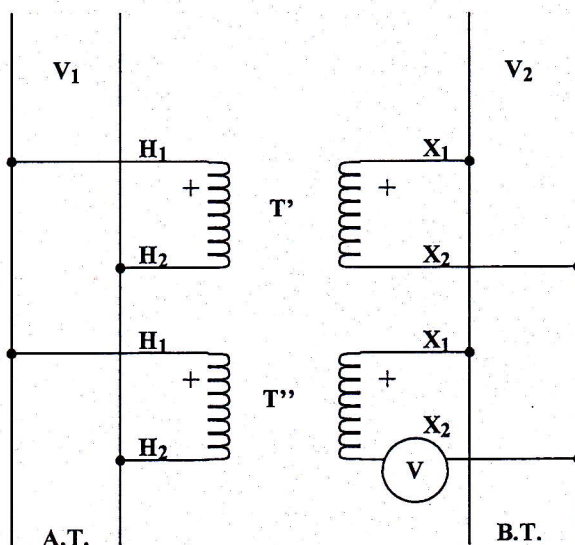


Fig. 3.3 TRANSFORMADORES MONOFASICOS EN PARALELO

Cuando el voltaje del voltímetro es cero la conexión es correcta y cuando el voltaje del voltímetro es $2V_2$ la conexión es incorrecta.

a. CIRCUITO EQUIVALENTE DE TRANSFORMADORES MONOFASICOS EN PARALELO

Para realizar el circuito equivalente de transformadores monofásicos en paralelo se considera lo siguiente:

La corriente de excitación I_ϕ de cada transformador es muy pequeña con respecto a la corriente del primario I_1 y por lo tanto se la puede despreciar, es decir:

$$I_\phi \ll I_1$$

$$I_\phi \approx 0$$

En base de lo asumido se presenta en la Fig. 3.4 el circuito equivalente de dos transformadores monofásicos en paralelo.

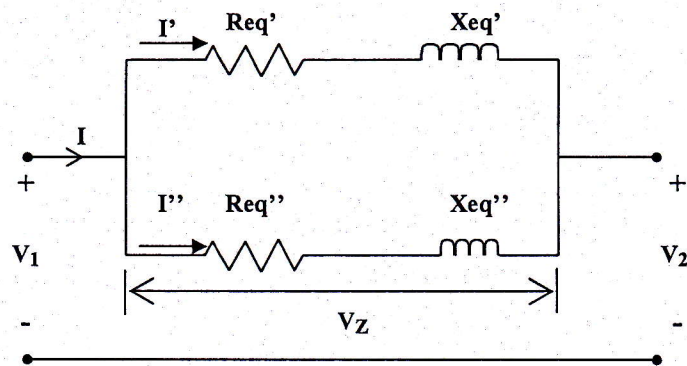


Fig. 3.4 CIRCUITO EQUIVALENTE DE DOS TRANSFORMADORES MONOFASICOS EN PARALELO

En la fig. 3.4 se tiene lo siguiente:

V_1 = voltaje del devanado primario

I = corriente de la carga referida al primario

I' = corriente del transformador T'

I'' = corriente del transformador T''

Req' = resistencia equivalente de los devanados del transformador T' referida al primario.

X_{eq}' = reactancia equivalente de los devanados del transformador T' referida al primario

R_{eq}'' = resistencia equivalente de los devanados del transformador T'' referida al primario.

X_{eq}'' = reactancia equivalente de los devanados del transformador T'' referida al primario

V_Z = voltaje de caída de tensión de las impedancias de los transformadores en paralelo

V_2' = voltaje del devanado secundario referido al primario

b. DIAGRAMA FASORIAL DE TRANSFORMADORES MONOFASICOS EN PARALELO

Para realizar el diagrama fasorial de dos transformadores monofásicos en paralelo se asume a cero grados el voltaje del secundario referida al primario V_2' y el diagrama fasorial se presenta en la Fig. 3.5.

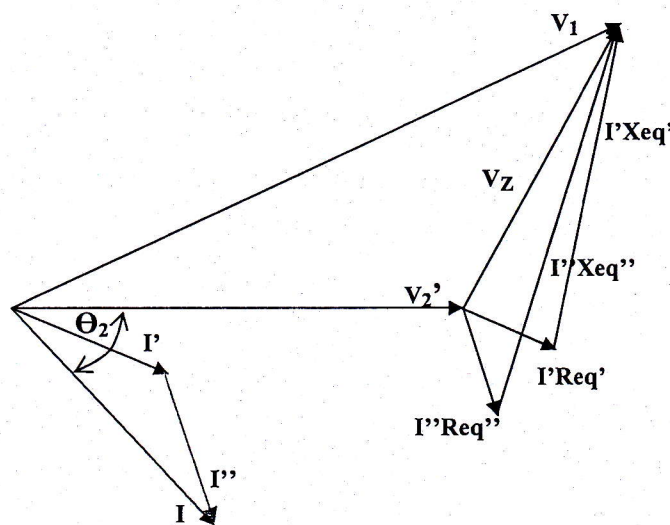


Fig. 3.5 DIAGRAMA FASORIAL DE DOS TRANSFORMADORES MONOFASICOS EN PARALELO

En la Fig. 3.5 se tiene lo siguiente:

V_2' = voltaje del secundario referido al primario a cero grados

I = corriente de la carga con un ángulo en atraso Θ_2

I' = corriente del transformador T'

I'' = corriente del transformador T''

V_Z = caída de tensión de las impedancias de los transformadores

V_1 = voltaje del primario

c. CONDICION PARA QUE CADA TRANSFORMADOR TRABAJE A PLENA CARGA

Para que los transformadores monofásicos en paralelo trabajen a plena carga tienen que cumplir una condición, para determinar esta condición se presenta en la Fig. 3.6 dos transformadores monofásicos en paralelo

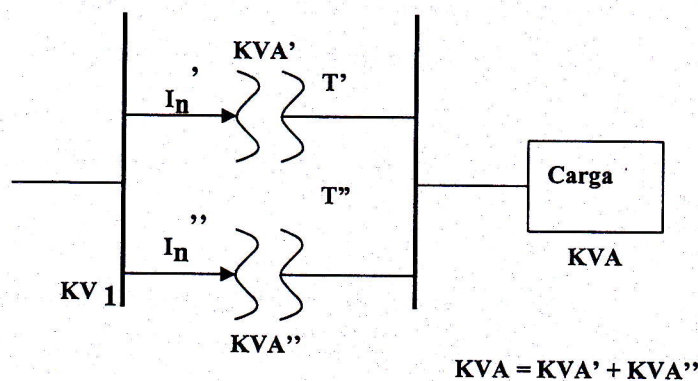


Fig. 3.6 DOS TRANSFORMADORES MONOFASICOS EN PARALELO

En la Fig. 3.6 el transformador T' tiene la capacidad KVA' y la corriente nominal I_n' y el transformador T'' tiene la capacidad KVA'' y la corriente nominal I_n'' . La barra del primario tiene el voltaje KV₁, por lo tanto:

$$KVA' = I_n' KV_1$$

$$KVA'' = I_n'' KV_1$$

$$\frac{KVA'}{KVA''} = \frac{I_n'}{I_n''}$$

Si Z' es la impedancia equivalente del transformador T' y Z'' es la impedancia equivalente del transformador T'', se tiene:

$$I_n' Z' = I_n'' Z''$$

$$\frac{I_n'}{I_n''} = \frac{Z''}{Z'}$$

Por lo tanto:

$$\frac{KVA'}{KVA''} = \frac{|Z'|}{|Z|}$$

Para que cada transformador monofásico pueda operar a plena carga, la relación de las capacidades tiene que ser igual al inverso de la relación de las magnitudes de las impedancias.

d. FACTOR DE POTENCIA DE CADA TRANSFORMADOR

Para determinar el factor de potencia de cada transformador monofásico en paralelo, se presenta en la Fig. 3.7 el circuito equivalente de dos transformadores monofásicos en paralelo.

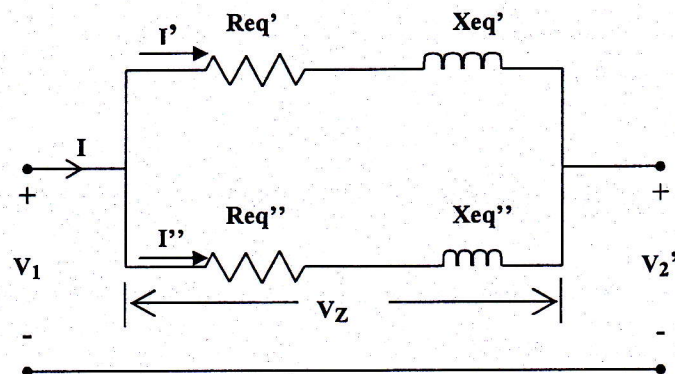


Fig. 3.7 CIRCUITO EQUIVALENTE DE DOS TRANSFORMADORES MONOFASICOS EN PARALELO

De acuerdo a la Fig. 3.7 se tiene:

$$I'Z' = IZ \quad \text{y} \quad I''Z'' = IZ$$

despejando las corrientes I' y I'' de los transformadores T' y T'' respectivamente:

$$I' = I \frac{Z}{Z'} = I \frac{|Z|}{|Z'|} \angle \theta_z - \theta_{z'} \quad \text{y} \quad I'' = I \frac{Z}{Z''} = I \frac{|Z|}{|Z''|} \angle \theta_z - \theta_{z''}$$

Donde:

$$Z = \frac{Z'Z''}{Z' + Z''}$$

En la Fig. 3.8 se presenta el diagrama fasorial de dos transformadores monofásicos en paralelo.

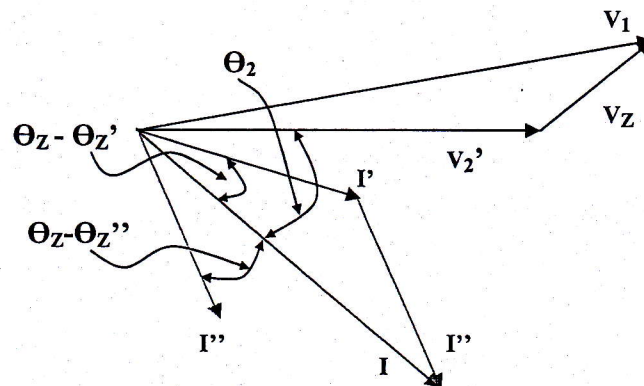


Fig. 3.8 DIAGRAMA FASORIAL DE DOS TRANSFORMADORES MONOFASICOS EN PARALELO

De acuerdo a la Fig. 3.8 se tiene lo siguiente:

Factor de Potencia del transformador T': $\cos(\theta_2 + \theta_Z - \theta_Z')$

Factor de potencia del transformador T'': $\cos(\theta_2 + \theta_Z - \theta_Z'')$

3.3 CONEXION TRIFASICA ESTRELLA – ESTRELLA

En la conexión trifásica estrella – estrella el primario esta conectado en estrella y el secundario también en estrella.

En la figura 3.9 se presenta la conexión trifásica estrella – estrella de tres transformadores monofásicos.

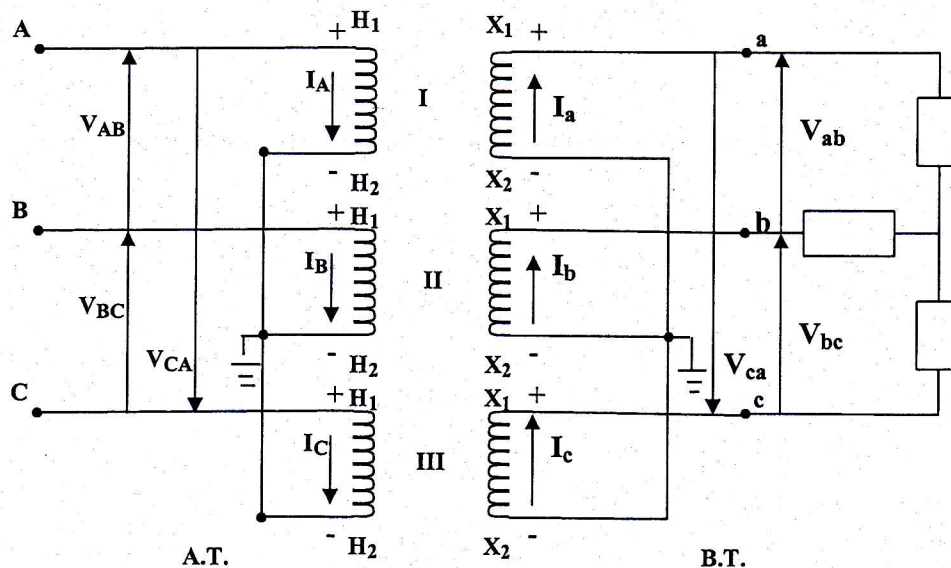


Fig. 3.9 CONEXION TRIFASICA ESTRELLA- ESTRELLA

Para realizar la conexión trifásica estrella – estrella se considera lo siguiente:

- Se dispone de tres transformadores monofásicos de polaridad sustractiva, el primario es alta tensión y el secundario es baja tensión.
- Se conectan los terminales de igual polaridad en el primario y en el secundario.
- Se aplica en el primario un sistema eléctrico trifásico de voltajes V_{AB} , V_{BC} y V_{CA} .
- Se conecta en el secundario una carga trifásica y se obtienen las corrientes de línea I_A , I_B y I_C en el primario y las corrientes de línea I_a , I_b y I_c en el secundario.

a. DIAGRAMAS FASORIALES DE LOS VOLTAJES

En la Fig 3.10 se presenta el diagrama fasorial de los voltajes del primario y del secundario de la conexión trifásica estrella – estrella.

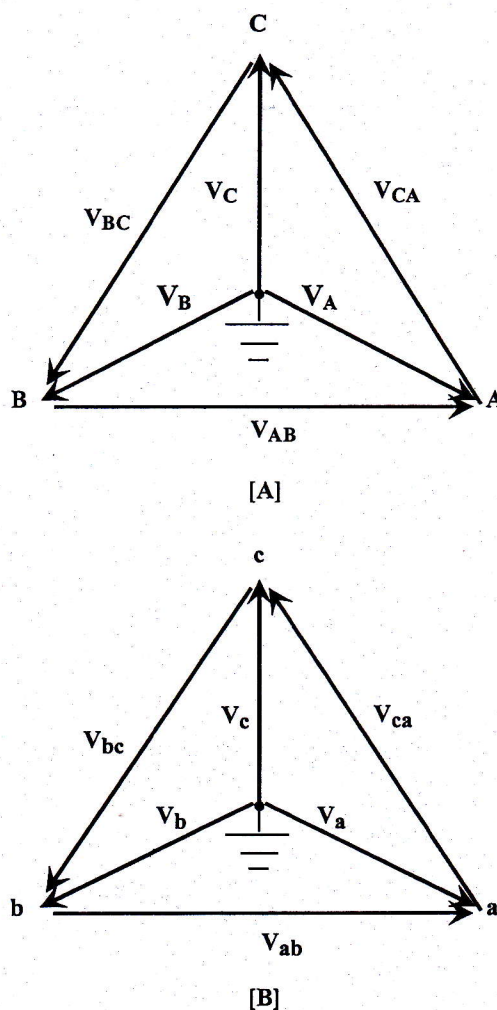


Fig. 3.10 DIAGRAMAS FASORIALES DE LOS VOLTAJES:
[A] PRIMARIO (ALTA TENSION)
[B] SECUNDARIO (BAJA TENSION)

Para realizar los diagramas fasoriales de los voltajes de la conexión trifásica estrella – estrella se considera lo siguiente:

- Se asume la secuencia ABC.
- Se desprecian las caídas de tensión de las impedancias de dispersión de los devanados primario y secundario de cada transformador.
- En el primario se considera el voltaje V_{AB} a cero grado y luego se obtienen los voltajes de línea V_{BC} y V_{CA} y los voltajes de fase V_A , V_B y V_C .
- Para obtener el diagrama fasorial de los voltajes del secundario se considera que los voltajes de fase V_a , V_b y V_c del secundario están en fase con los voltajes de fase V_A , V_B y V_C del primario. Luego se obtienen los voltajes de línea V_{ab} , V_{bc} y V_{ca} del secundario.

b. DIAGRAMAS FASORIALES DE LAS CORRIENTES

En la Fig 3.11 se presenta el diagrama de las corrientes de la conexión trifásica estrella – estrella y con carga en estrella.

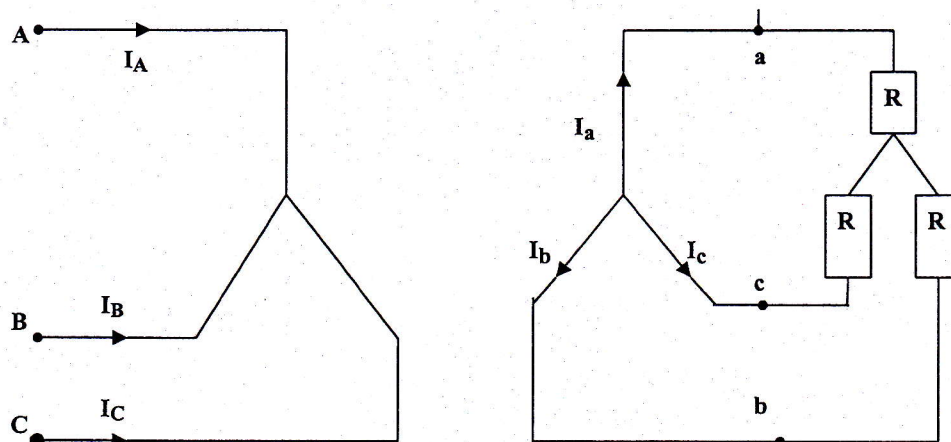


Fig. 3.11 DIAGRAMA DE LAS CORRIENTES DE LA CONEXION ESTRELLA – ESTRELLA

Para realizar el diagrama fasorial de las corrientes se tiene que considerar el diagrama fasorial de los voltajes del secundario y el factor de potencia de la carga.

En la Fig 3.12 se presenta el diagrama fasorial de las corrientes del secundario y del primario de la conexión trifásica estrella – estrella.

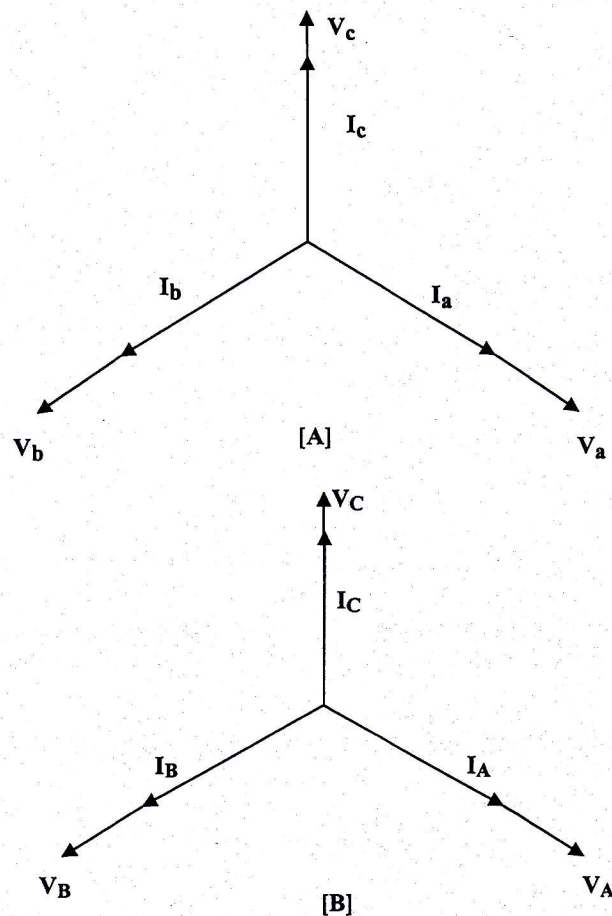


Fig. 3.12 DIAGRAMAS FASORIALES DE LAS CORRIENTES:
[A] SECUNDARIO (BAJA TENSION)
[B] PRIMARIO (ALTA TENSION)

Para realizar los diagramas fasoriales de las corrientes de la conexión trifásica estrella – estrella se considera lo siguiente:

- Se desprecia la corriente de excitación de cada transformador.
- Se considera una carga trifásica simétrica y resistiva pura.
- En el secundario las corrientes de línea I_a , I_b y I_c de la carga están en fase con los voltajes de fase V_a , V_b y V_c respectivamente.
- Para obtener el diagrama fasorial de las corrientes del primario se considera que las corrientes de fase I_A , I_B y I_C del primario están en fase con las corrientes de fase I_a , I_b y I_c del secundario.

c. RELACIONES DE TRANSFORMACION

En la Fig 3.13 se presenta la conexión trifásica estrella – estrella con el número de vueltas de los devanados del primario y secundario.

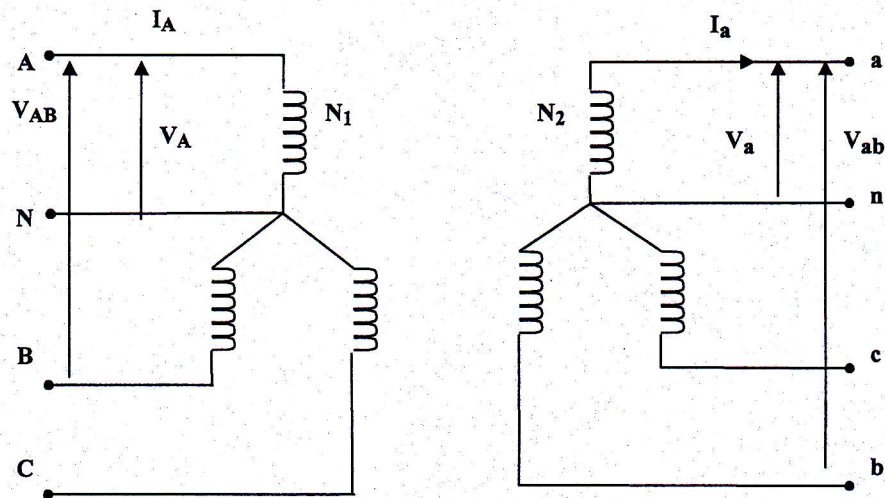


Fig. 3.13 DIAGRAMA DE LA CONEXION ESTRELLA – ESTRELLA CON EL NUMERO DE VUELTAS DE LOS DEVANADOS

Las relaciones de transformación de los voltajes primario – secundario son:

$$\frac{V_A}{V_a} = \frac{N_1}{N_2}$$

$$\frac{V_{AB}}{V_{ab}} = \frac{\sqrt{3}N_1}{\sqrt{3}N_2} = \frac{N_1}{N_2}$$

La relación de transformación de las corrientes primario – secundario es:

$$\frac{I_A}{I_a} = \frac{N_2}{N_1}$$

3.4 CONEXION TRIFASICA DELTA - DELTA

En la conexión trifásica delta - delta el primario esta conectado en delta y el secundario también en delta.

En la figura 3.14 se presenta la conexión trifásica delta – delta de tres transformadores monofásicos

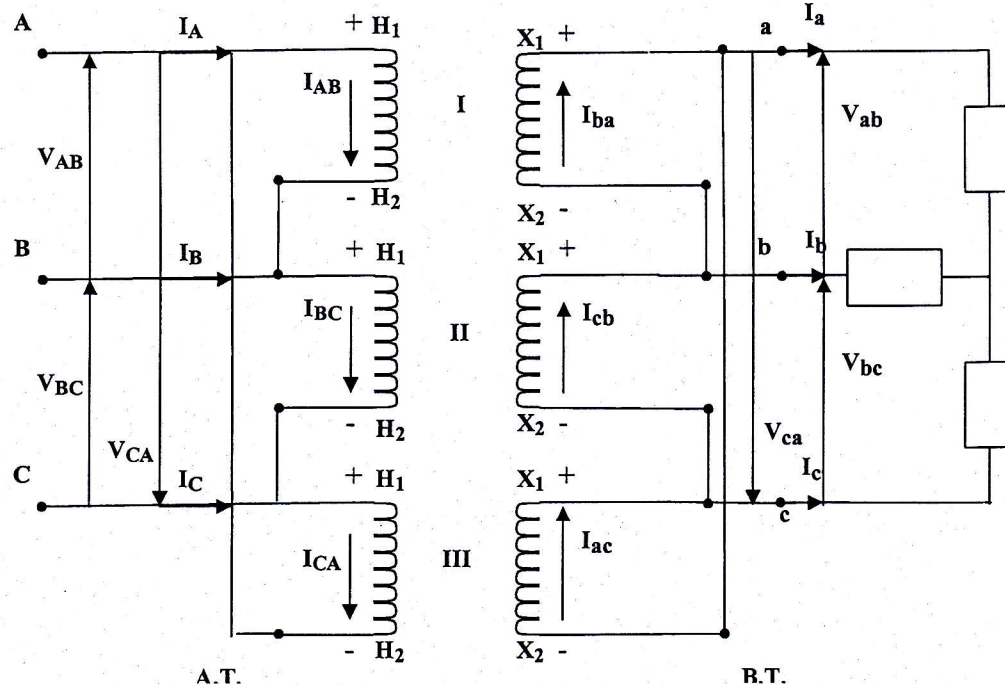


Fig. 3.14 CONEXION TRIFASICA DELTA – DELTA

Para realizar la conexión trifásica delta – delta se considera lo siguiente:

- Se dispone de tres transformadores monofásicos de polaridad sustractiva, el primario es alta tensión y el secundario es baja tensión.
- Se conectan los terminales de diferente polaridad en el primario y en el secundario.
- Se aplica en el primario un sistema eléctrico trifásico de voltajes V_{AB} , V_{BC} y V_{CA} .
- Se conecta en el secundario una carga trifásica y se obtienen las corrientes de línea I_A , I_B y I_C y de fase I_{AB} , I_{BC} y I_{CA} en el primario y las corrientes de fase I_{ba} , I_{cb} y I_{ac} y de línea I_a , I_b y I_c en el secundario.

a. DIAGRAMAS FASORIALES DE LOS VOLTAJES.

En la Fig. 3.15 se presenta el diagrama fasorial de los voltajes del primario y del secundario de la conexión trifásica delta - delta.

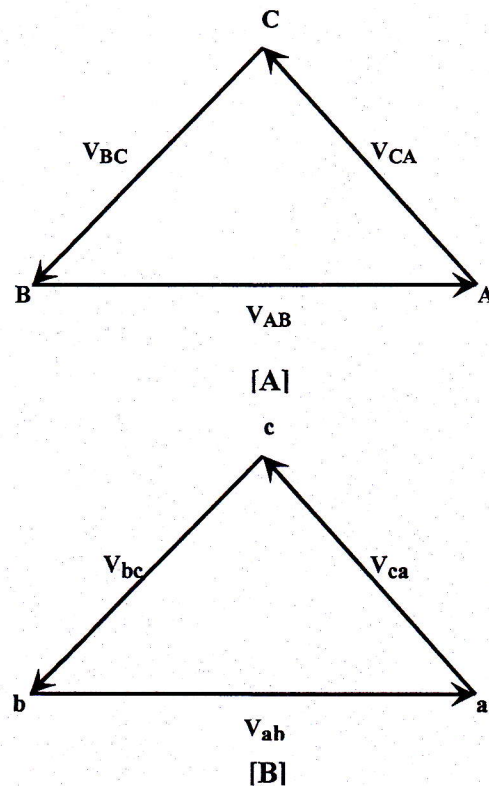


Fig. 3.15 DIAGRAMAS FASORIALES DE LOS VOLTAJES
[A] PRIMARIO (ALTA TENSION)
[B] SECUNDARIO (BAJA TENSION)

Para realizar los diagramas fasoriales de los voltajes de la conexión trifásica delta - delta se considera lo siguiente:

- Se asume la secuencia ABC.
- Se desprecian las caídas de tensión de las impedancias de dispersión de los devanados primario y secundario de cada transformador.
- En el primario se considera el voltaje V_{AB} a cero grados y luego se obtienen los voltajes de línea V_{BC} y V_{CA} .
- Para obtener el diagrama fasorial de los voltajes del secundario se considera que los voltajes de fase V_{ab} , V_{bc} y V_{ca} del secundario están en fase con los voltajes de fase V_{AB} , V_{BC} y V_{CA} del primario.

b. DIAGRAMAS FASORIALES DE LAS CORRIENTES

En la Fig. 3.16 se presenta el diagrama de las corrientes de la conexión trifásica delta - delta y con carga en delta.

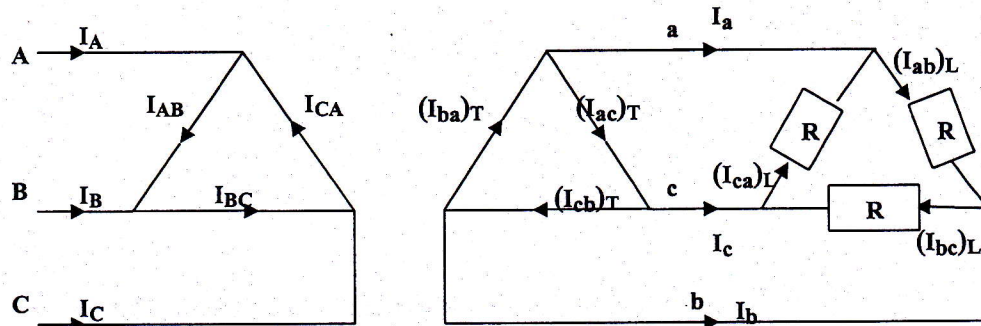
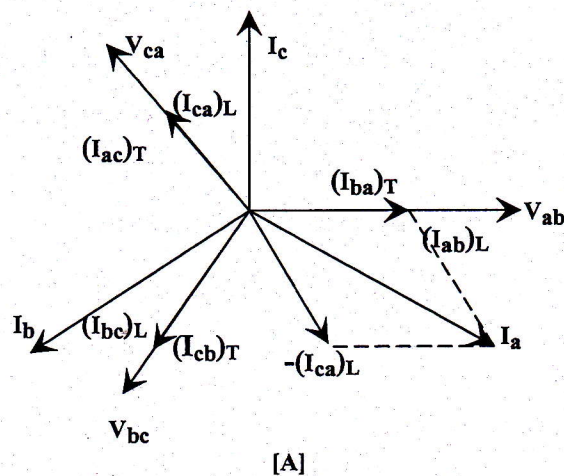


Fig. 3.16 DIAGRAMA DE LAS CORRIENTES DE LA CONEXION DELTA - DELTA

Para realizar el diagrama fasorial de las corrientes se tiene que considerar el diagrama fasorial de los voltajes del secundario y el factor de potencia de la carga.

En la Fig. 3.17 se presenta el diagrama fasorial de las corrientes del secundario y del primario de la conexión trifásica delta - delta.



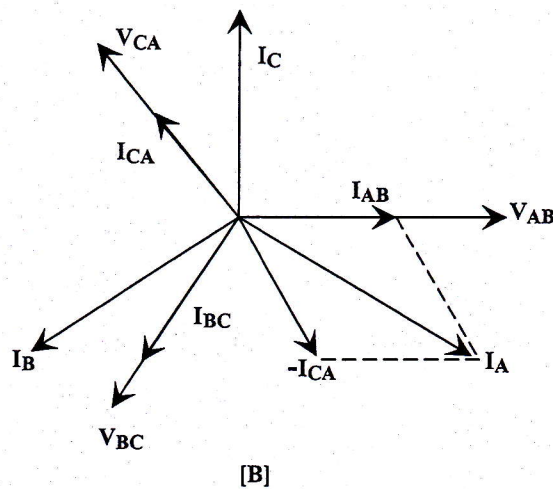


Fig. 3.17 DIAGRAMAS FASORIALES DE LAS CORRIENTES:
[A] SECUNDARIO (BAJA TENSION)
[B] PRIMARIO (ALTA TENSION)

Para realizar los diagramas fasoriales de las corrientes de la conexión trifásica delta - delta se considera lo siguiente:

- Se despreja la corriente de excitación de cada transformador.
- Se considera una carga trifásica simétrica y resistiva pura.
- En el secundario las corrientes de fase de la carga $(I_{ab})_L$, $(I_{bc})_L$ y $(I_{ca})_L$ están en fase con los voltajes de línea V_{ab} , V_{bc} y V_{ca} respectivamente. Las corrientes de línea I_a , I_b y I_c del secundario se obtienen sumando las corrientes de fase de la carga en los correspondientes nudos. Las corrientes de fase $(I_{ba})_T$, $(I_{cb})_T$ y $(I_{ac})_T$ en el secundario del transformador son iguales a las corrientes de fase de la carga.
- Para obtener el diagrama fasorial de las corrientes del primario se considera que las corrientes de fase I_{AB} , I_{BC} y I_{CA} del primario están en fase con las corrientes de fase $(I_{ab})_T$, $(I_{bc})_T$ y $(I_{ca})_T$ del secundario del transformador. Las corrientes de línea I_A , I_B y I_C del primario se obtienen sumando las corrientes de fase del primario en los correspondientes nudos.

c. RELACIONES DE TRANSFORMACION

En la Fig. 3.18 se presenta la conexión trifásica delta - delta con el número de vueltas de los devanados primario y secundario.

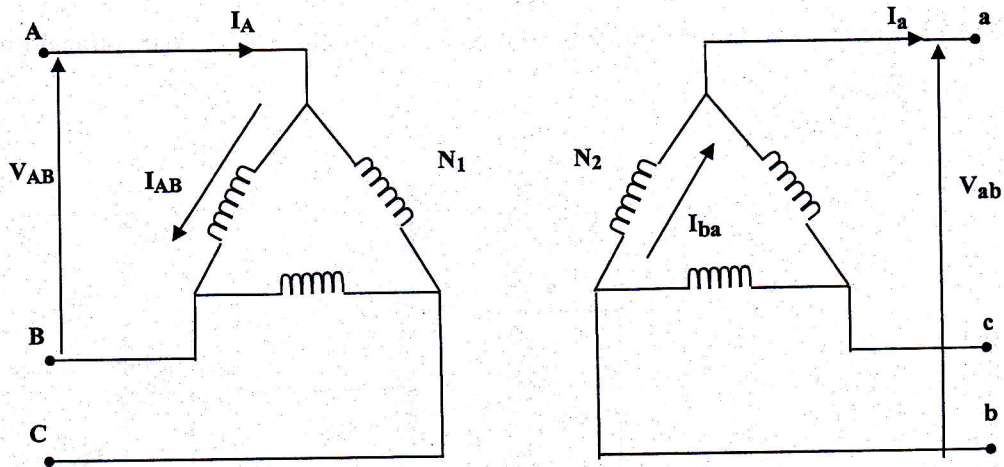


Fig. 3.18 DIAGRAMA DE LA CONEXION DELTA-DELTA CON EL NUMERO DE VUELTAS DE LOS DEVANADOS

La relación de transformación de los voltajes primario – secundario es:

$$\frac{V_{AB}}{V_{ab}} = \frac{N_1}{N_2}$$

Las relaciones de transformación de las corrientes primario – secundario son:

$$\frac{I_{AB}}{I_{ba}} = \frac{N_2}{N_1}$$

$$\frac{I_A}{I_a} = \frac{\sqrt{3}N_2}{\sqrt{3}N_1} = \frac{N_2}{N_1}$$

3.5 CONEXION TRIFASICA ESTRELLA - DELTA

En la conexión trifásica estrella – delta el primario esta conectado en estrella y el secundario en delta.

En la Fig. 3.19 se presenta la conexión trifásica estrella – delta de tres transformadores monofásicos.

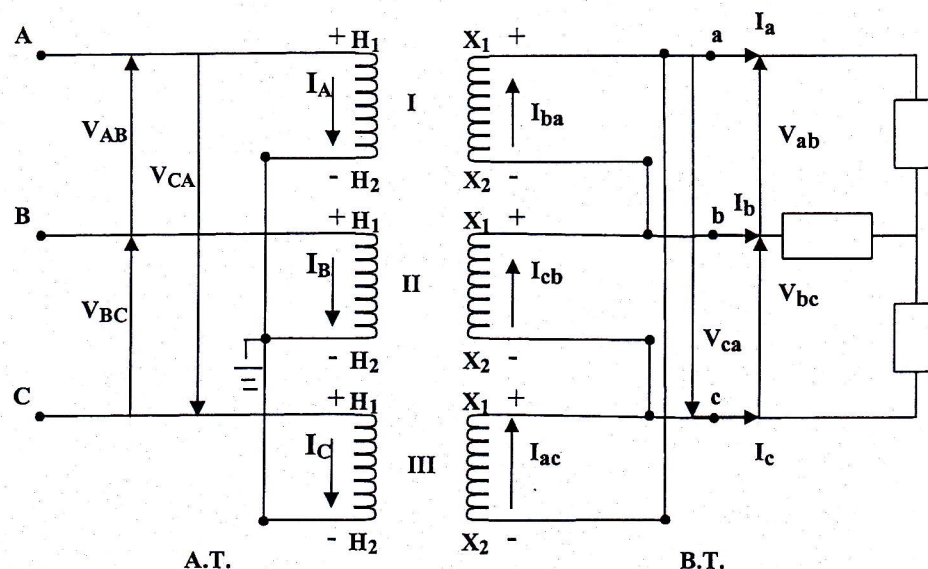


Fig. 3.19 CONEXION TRIFASICA ESTRELLA – DELTA

Para realizar la conexión trifásica estrella – delta se considera lo siguiente:

- Se dispone de tres transformadores monofásicos de polaridad sustractiva, el primario es alta tensión y el secundario es baja tensión.
- Se conectan los terminales de igual polaridad en el primario y de diferente polaridad en el secundario.
- Se aplica en el primario un sistema eléctrico trifásico de voltajes V_{AB} , V_{BC} y V_{CA} .
- Se conecta en el secundario una carga trifásica y se obtienen las corrientes de línea I_A , I_B y I_C en el primario y las corrientes de fase I_{ba} , I_{cb} y I_{ac} y de línea I_a , I_b y I_c en el secundario.

a. DIAGRAMAS FASORIALES DE LOS VOLTAJES.

En la Fig. 3.20 se presenta el diagrama fasorial de los voltajes del primario y del secundario de la conexión trifásica estrella – delta.

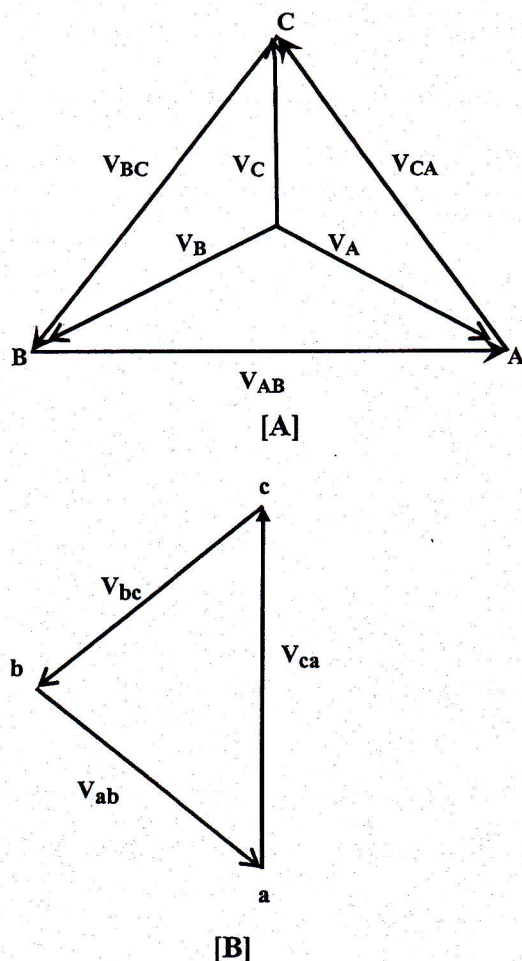


Fig. 3.20 DIAGRAMAS FASORIALES DE LOS VOLTAJES
[A] PRIMARIO (ALTA TENSION)
[B] SECUNDARIO (BAJA TENSION)

Para realizar los diagramas fasoriales de los voltajes de la conexión trifásica estrella – delta se considera lo siguiente:

- Se asume la secuencia ABC.
- Se desprecian las caídas de tensión de las impedancias de dispersión de los devanados primario y secundario de cada transformador.
- En el primario se considera el voltaje V_{AB} a cero grado y luego se obtienen los voltajes de línea V_{BC} y V_{CA} y de fase V_A , V_B y V_C .

- Para obtener el diagrama fasorial de los voltajes del secundario se considera que los voltajes de fase V_{ab} , V_{bc} y V_{ca} del secundario están en fase con los voltajes de fase V_A , V_B y V_C del primario.

b. DIAGRAMAS FASORIALES DE LAS CORRIENTES

En la Fig. 3.21 se presenta el diagrama de las corrientes de la conexión trifásica estrella – delta y con carga en delta.

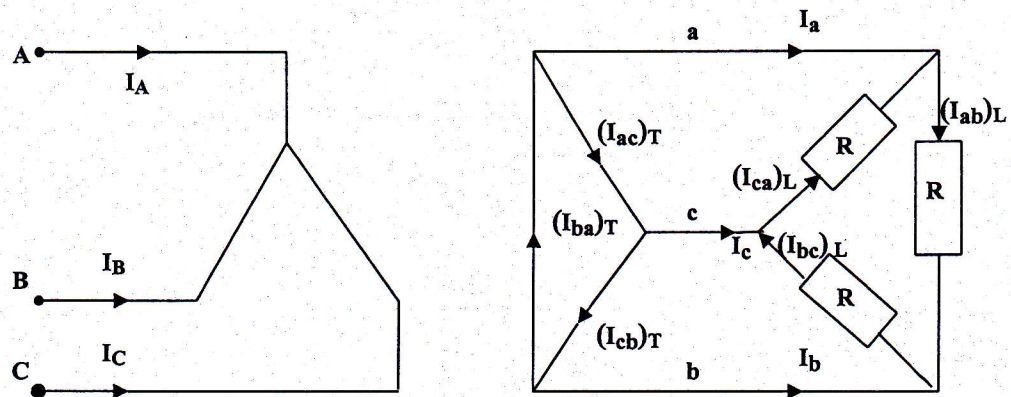


Fig. 3.21 DIAGRAMA DE LAS CORRIENTES DE LA CONEXION ESTRELLA - DELTA

Para realizar el diagrama fasorial de las corrientes se tiene que considerar el diagrama fasorial de los voltajes del secundario y el factor de potencia de la carga.

En la Fig. 3.22 se presenta el diagrama fasorial de las corrientes del secundario y del primario de la conexión trifásica estrella – delta.

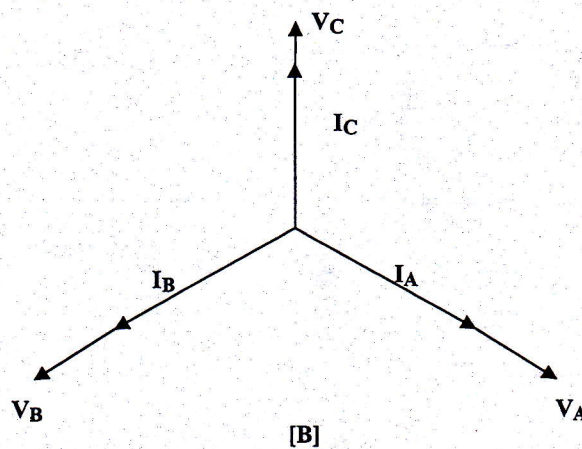
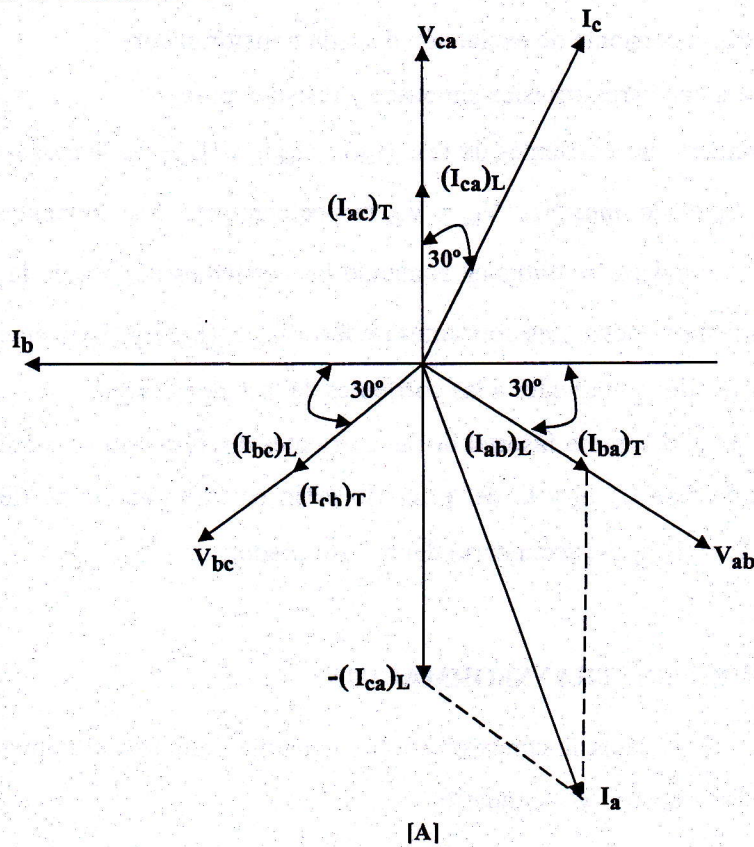


Fig. 3.22 DIAGRAMAS FASORIALES DE LAS CORRIENTES:
[A] SECUNDARIO (BAJA TENSION)
[B] PRIMARIO (ALTA TENSION)

Para realizar los diagramas fasoriales de las corrientes de la conexión trifásica estrella – delta se considera lo siguiente:

- Se desprecia la corriente de excitación de cada transformador.
- Se considera una carga trifásica simétrica y resistiva pura.
- En el secundario las corrientes de fase $(I_{ab})_L$, $(I_{bc})_L$ y $(I_{ca})_L$ de la carga están en fase con los voltajes de línea V_{ab} , V_{bc} y V_{ca} respectivamente. Las corrientes de línea I_a , I_b y I_c del secundario se obtienen sumando las corrientes de fase de la carga en los correspondientes nudos. Las corrientes de fase $(I_{ba})_T$, $(I_{cb})_T$ y $(I_{ac})_T$ en el secundario del transformador son iguales a las corrientes de fase de la carga.
- Para obtener el diagrama fasorial de las corrientes del primario se considera que las corrientes de fase I_A , I_B y I_C del primario están en fase con las corrientes de fase $(I_{ab})_T$, $(I_{bc})_T$ y $(I_{ca})_T$ del secundario del transformador.

c. RELACIONES DE TRANSFORMACION

En la Fig. 3.23 se presenta la conexión trifásica estrella-delta con el número de vueltas de los devanados primario y secundario.

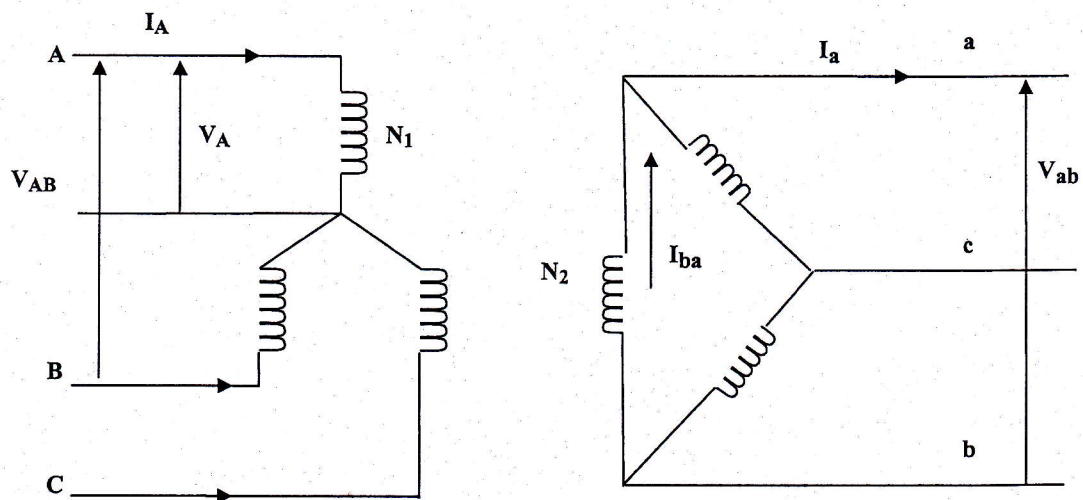


Fig. 3.23 DIAGRAMA DE LA CONEXION ESTRELLA-DELTA CON EL NUMERO DE VUELTAS DE LOS DEVANADOS

Las relaciones de transformación de los voltajes primario – secundario son:

$$\frac{V_A}{V_{ab}} = \frac{N_1}{N_2}$$

$$\frac{V_{AB}}{V_{ab}} = \sqrt{3} \frac{N_1}{N_2}$$

Las relaciones de transformación de las corrientes primario – secundario son:

$$\frac{I_A}{I_{ba}} = \frac{N_2}{N_1}$$

$$\frac{I_A}{I_a} = \frac{N_2}{\sqrt{3}N_1}$$

3.6 CONEXION TRIFASICA DELTA - ESTRELLA

En la conexión trifásica delta-estrella el primario esta conectado en delta y el secundario en estrella.

En la Fig. 3.24 se presenta la conexión trifásica delta-estrella de tres transformadores monofásicos.

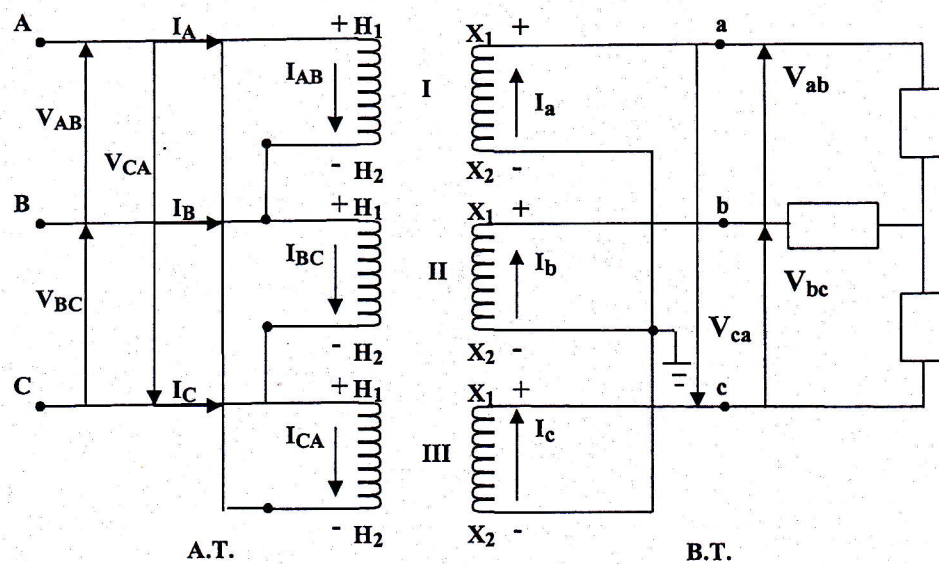


Fig. 3.24 CONEXION TRIFASICA DELTA-ESTRELLA

Para realizar la conexión trifásica delta - estrella se considera lo siguiente:

- Se dispone de tres transformadores monofásicos de polaridad sustractiva, el primario es alta tensión y el secundario es baja tensión.
- Se conectan las terminales de diferente polaridad en el primario y de igual polaridad en el secundario.
- Se aplica en el primario un sistema eléctrico trifásico de voltajes V_{AB} , V_{BC} y V_{CA} .
- Se conecta en el secundario una carga trifásica y se obtienen las corrientes de línea I_A , I_B y I_C y las corrientes de fase I_{AB} , I_{BC} y I_{CA} en el primario y de línea I_a , I_b y I_c en el secundario.

a. DIAGRAMAS FASORIALES DE LOS VOLTAJES

En la Fig. 3.25 se presenta el diagrama fasorial de los voltajes del primario y del secundario de la conexión trifásica delta – estrella.

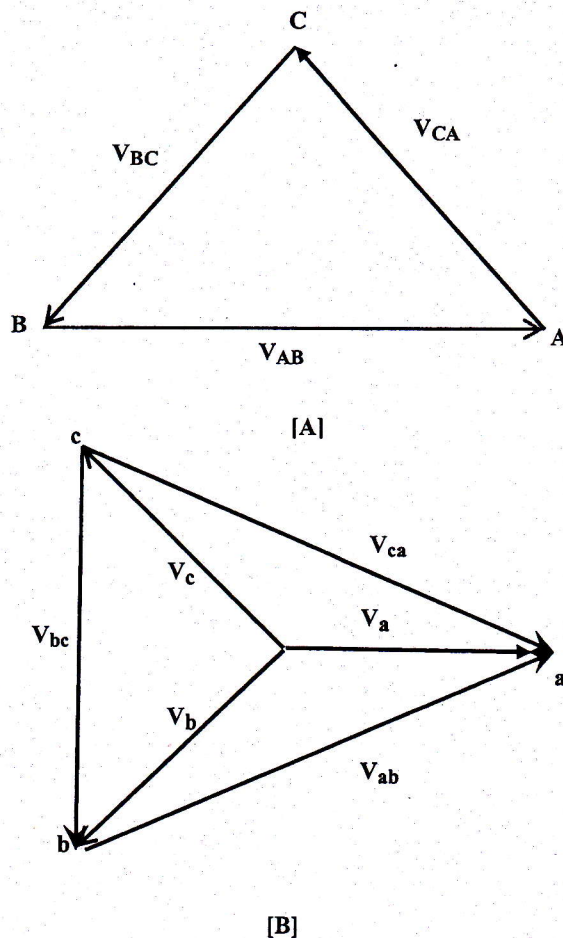


Fig. 3.25 DIAGRAMAS FASORIALES DE LOS VOLTAJES:
[A] PRIMARIO (ALTA TENSION)
[B] SECUNDARIO (BAJA TENSION)

Para realizar los diagramas fasoriales de los voltajes de la conexión trifásica delta – estrella se considera lo siguiente:

- Se asume la secuencia ABC.
- Se desprecian las caídas de tensión de las impedancias de dispersión de los devanados primario y secundario de cada transformador.
- En el primario se considera el voltaje V_{AB} a cero grados y luego se obtienen los voltajes de línea V_{BC} y V_{CA} .
- Para obtener el diagrama fasorial de los voltajes del secundario se considera que los voltajes de fase V_a , V_b y V_c del secundario están en fase con los voltajes de fase V_{AB} , V_{BC} y V_{CA} del primario. Luego se obtienen los voltajes de línea V_{ab} , V_{bc} y V_{ca} del secundario.

b. DIAGRAMAS FASORIALES DE LAS CORRIENTES

En la Fig. 3.26 se presenta el diagrama de las corrientes de la conexión trifásica delta – estrella y con carga en estrella.

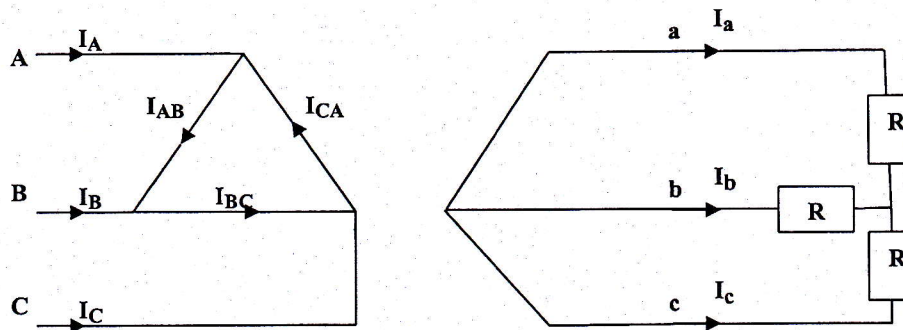


Fig. 3.26 DIAGRAMA DE LAS CORRIENTES DE LA CONEXION DELTA - ESTRELLA

Para realizar el diagrama fasorial de las corrientes se tiene que considerar el diagrama fasorial de los voltajes del secundario y el factor de potencia de la carga.

En la Fig. 3.27 se presenta el diagrama fasorial de las corrientes del secundario y del primario de la conexión trifásica delta – estrella.

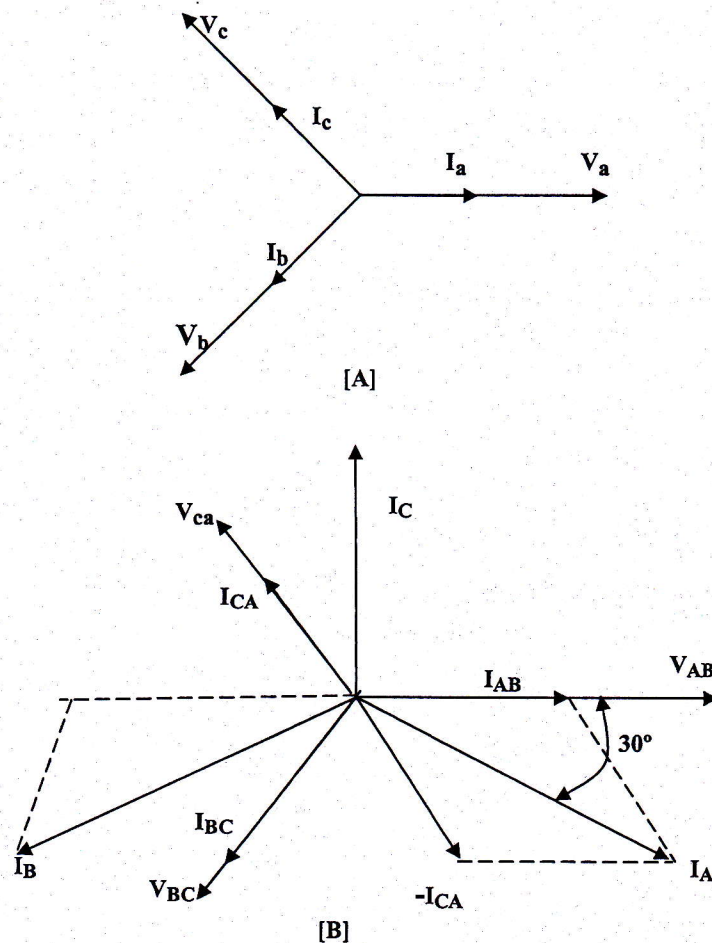


Fig. 3.27 DIAGRAMAS FASORIALES DE LAS CORRIENTES:
[A] SECUNDARIO (BAJA TENSION)
[B] PRIMARIO (ALTA TENSION)

Para realizar los diagramas fasoriales de las corrientes de la conexión trifásica delta – estrella se considera lo siguiente:

- Se desprecia la corriente de excitación de cada transformador.
- Se considera una carga trifásica simétrica y resistiva pura.
- En el secundario la corriente de línea I_a , I_b y I_c de la carga están en fase con los voltajes de fase V_a , V_b y V_c .
- Para obtener el diagrama fasorial de las corrientes del primario se considera que las corrientes de fase I_{AB} , I_{BC} y I_{CA} del primario están en fase con las corrientes de fase I_a , I_b y I_c del secundario.

c. RELACIONES DE TRANSFORMACION

En la figura 3.28 se presenta la conexión trifásica delta - estrella con el número de vueltas de los devanados primario y secundario.

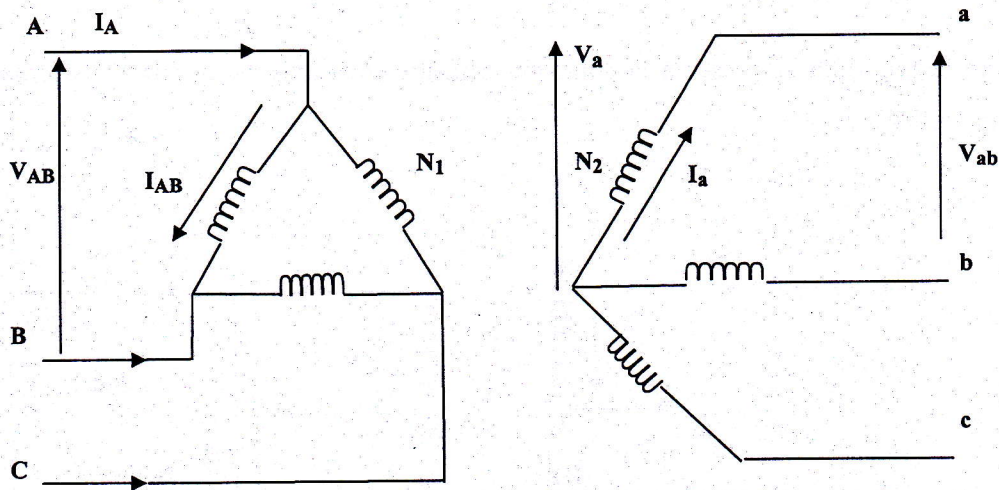


Fig. 3.28 DIAGRAMA DE LA CONEXION DELTA-ESTRELLA CON EL NUMERO DE VUELTAS DE LOS DEVANADOS

Las relaciones de transformación de los voltajes primario – secundario son:

$$\frac{V_{AB}}{V_a} = \frac{N_1}{N_2}$$

$$\frac{V_{AB}}{V_{ab}} = \frac{N_1}{\sqrt{3}N_2}$$

Las relaciones de transformación de las corrientes primario – secundario son:

$$\frac{I_{AB}}{I_a} = \frac{N_2}{N_1}$$

$$\frac{I_A}{I_a} = \frac{\sqrt{3}N_2}{N_1}$$

3.7 CONEXION TRIFASICA DELTA ABIERTO

En la conexión trifásica delta abierto se conectan dos transformadores para dar servicio trifásico y el primario se conecta en delta abierto y el secundario también en delta abierto.

En la Fig. 3.29 se presenta la conexión trifásica delta abierto de dos transformadores monofásicos

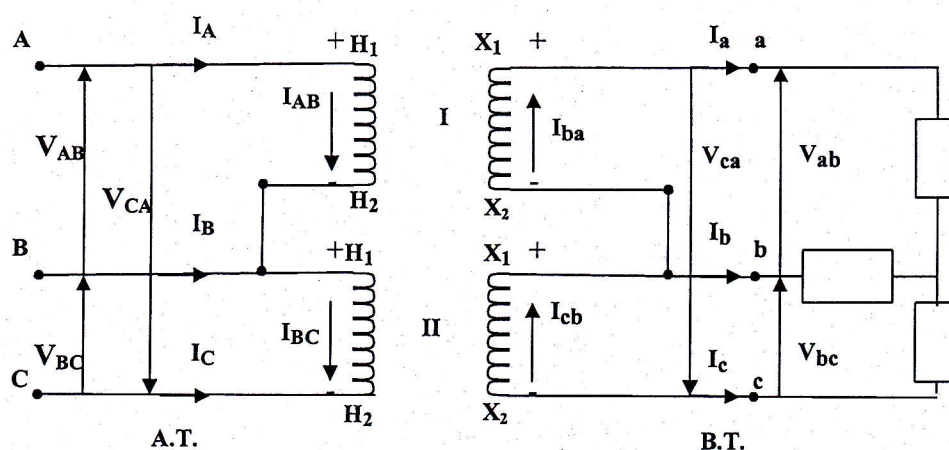


Fig. 3.29 CONEXION TRIFASICA DELTA ABIERTO

Para analizar la conexión trifásica delta abierto se considera lo siguiente:

- Se dispone de dos transformadores monofásicos de polaridad sustractiva, el primario es alta tensión y el secundario es baja tensión.
- Se conectan los terminales de diferente polaridad en el primario y de diferente polaridad con el secundario.
- Se aplica en el primario un sistema eléctrico trifásico de voltajes V_{AB} , V_{BC} y V_{CA} .
- Se conecta en el secundario una carga trifásica y se definen las corrientes de línea I_A , I_B y I_C y fase I_{AB} y I_{BC} en el primario y las corrientes de fase I_{ba} y I_{cb} y línea I_a , I_b y I_c en el secundario.

a. DIAGRAMAS FASORALES DE LOS VOLTAJES

En la figura 3.30 se presenta el diagrama fasorial de los voltajes del primario y del secundario de la conexión trifásica delta abierto.

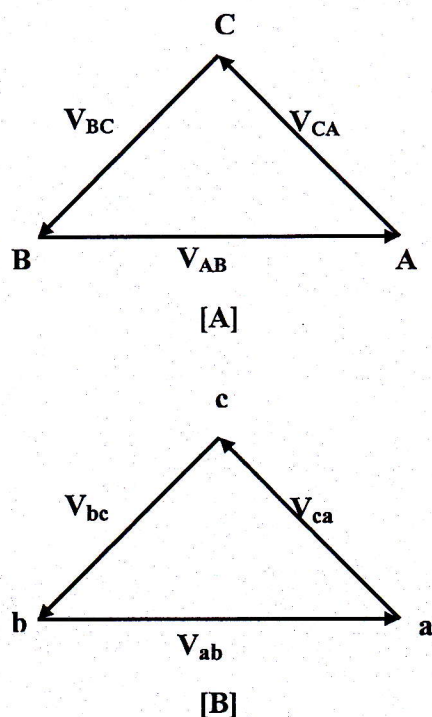


Fig. 3.30 DIAGRAMAS FASORIALES DE LOS VOLTAJES
[A] PRIMARIO (ALTA TENSION)
[B] SECUNDARIO (BAJA TENSION)

Para realizar los diagramas fasoriales de los voltajes de la conexión trifásica delta abierto se considera lo siguiente:

- Se asume la secuencia ABC.
- Se desprecian las caídas de tensión de las impedancias de dispersión de los devanados primario y secundario de cada transformador.
- En el primario se considera el voltaje V_{AB} a cero grado y luego se obtienen los voltajes de línea V_{BC} y V_{CA} .
- Para obtener el diagrama fasorial de los voltajes del secundario se considera que los voltajes de fase V_{ab} , V_{bc} y V_{ca} del secundario están en fase con los voltajes de fase V_{AB} , V_{BC} y V_{CA} del primario.

b. DIAGRAMAS FASORIALES DE LAS CORRIENTES

En la Fig. 3.31 se presenta el diagrama de las corrientes de la conexión trifásica delta abierto y con carga en delta.

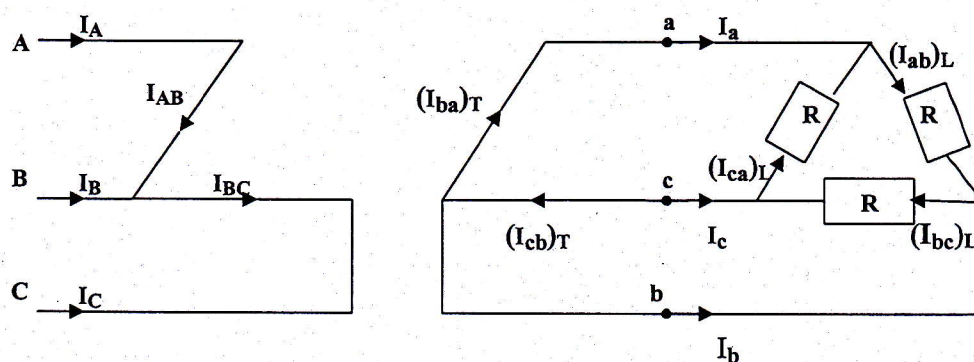
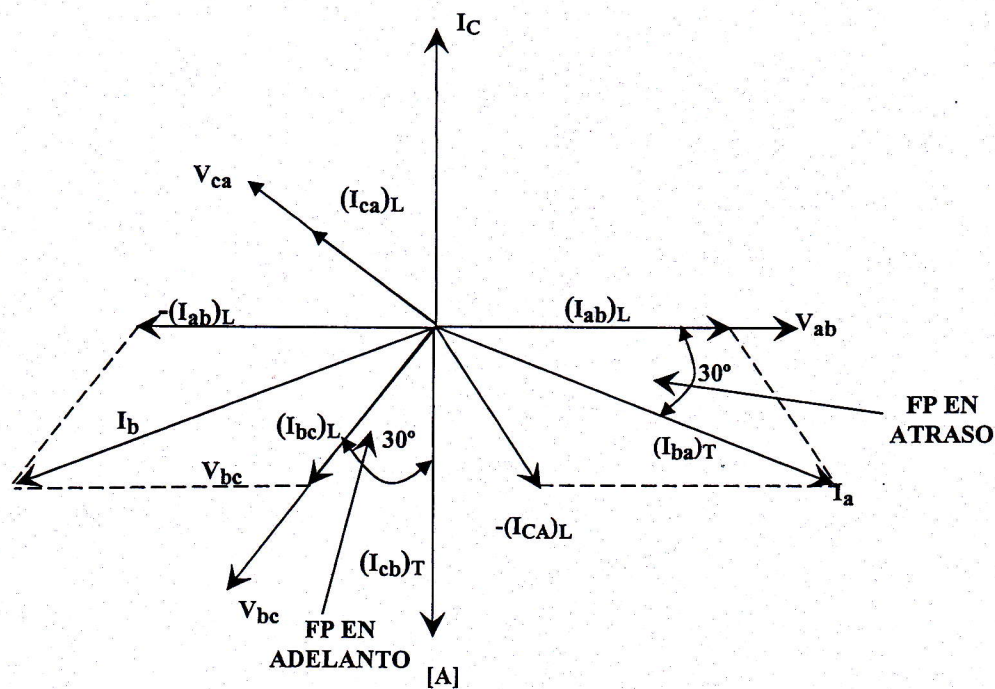


Fig. 3.31 DIAGRAMA DE LAS CORRIENTES DE LA CONEXION DELTA ABIERTO

Para analizar el diagrama fasorial de las corrientes se tiene que considerar el diagrama fasorial de los voltajes del secundario y el factor de potencia de la carga.

En la Fig. 3.32 se presenta el diagrama fasorial de las corrientes del secundario y del primario de la conexión trifásica delta abierto.



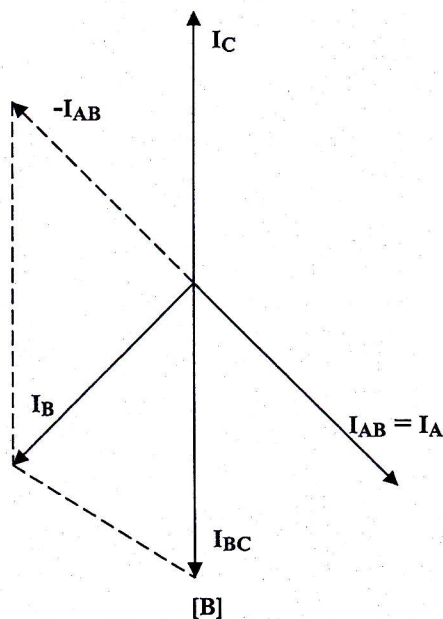


Fig. 3.32 DIAGRAMAS FASORIALES DE LAS CORRIENTES
[A] SECUNDARIO (BAJA TENSION)
[B] PRIMARIO (ALTA TENSION)

Para realizar los diagramas fasoriales de las corrientes de la conexión trifásica delta abierto se considera lo siguiente:

- Se desprecia la corriente de excitación de cada transformador.
- Se considera una carga trifásica simétrica y resistiva pura.
- En el secundario las corrientes de fase $(I_{ab})_L$, $(I_{bc})_L$ y $(I_{ca})_L$ de la carga están en fase con los voltajes de línea V_{ab} , V_{bc} y V_{ca} . Las corrientes de línea I_a , I_b y I_c del secundario se obtienen sumando las corrientes de fase de la carga en los correspondientes nudos. Las corrientes de fase $(I_{ba})_T$ y $(I_{cb})_T$ en el secundario de los transformadores son en magnitud iguales a las corrientes de línea del secundario.
- De acuerdo al diagrama fasorial de las corrientes del secundario, el transformador conectado entre las fases ab tiene factor de potencia en atraso y el transformador conectado entre las fases bc tiene factor de potencia en adelanto.
- Para obtener el diagrama fasorial de las corrientes del primario se considera que las corrientes de fase I_{AB} y I_{BC} del primario del transformador están en fase con las corrientes de fase $(I_{ba})_T$ y $(I_{cb})_T$ del secundario de los transformadores. Las corrientes de línea I_A , I_B y I_C del primario se obtienen en base de las corrientes de fase I_{AB} y I_{BC} del primario de los transformadores.

c. CAPACIDAD INSTALADA Y CAPACIDAD DE CARGA

La capacidad instalada de la conexión trifásica delta abierto es el 67 % de la capacidad instalada de la conexión trifásica delta – delta, es decir:

$$(VA)^{\angle}_{CAPACIDAD\ INSTALADA} = 0,67(VA)^{\Delta}_{CAPACIDAD\ INSTALADA} = 0,67\sqrt{3} V_L I_L$$

En la conexión delta abierto la corriente de línea es igual a la corriente de fase, por lo cual la capacidad de carga de la conexión trifásica delta abierto es:

$$(VA)^{\angle}_{CAPACIDAD\ CARGA} = \sqrt{3} V_L I_F$$

En la conexión trifásica delta abierto la relación de la capacidad de carga con respecto a la capacidad instalada es:

$$\frac{(VA)^{\angle}_{CAPACIDAD\ CARGA}}{(VA)^{\angle}_{CAPACIDAD\ INST.}} = \frac{\sqrt{3}V_L I_F}{0,67 \times \sqrt{3}V_L I_F \sqrt{3}} = 0,866$$

$$(VA)^{\angle}_{CAPACIDAD\ CARGA} = 86,6\%(VA)^{\angle}_{CAPACIDAD\ INSTALADA}$$

Es decir que la capacidad de carga de la conexión trifásica delta abierto es el 86.6 % de su capacidad instalada. La relación de la capacidad de carga de la conexión delta abierto con respecto a la capacidad de carga de la conexión delta – delta es:

$$\frac{(VA)^{\angle}_{CAPACIDAD\ CARGA}}{(VA)^{\angle}_{CAPACIDAD\ CARGA}} = \frac{\sqrt{3}V_L I_F}{\sqrt{3}V_L I_L} = 0,58$$

$$(VA)^{\angle}_{CAPACIDAD\ CARGA} = 58\%(VA)^{\Delta}_{CAPACIDAD\ CARGA}$$

Es decir que la capacidad de carga de la conexión trifásica delta abierto es el 58 % de la capacidad de carga de la conexión trifásica delta – delta.

3.4 CONEXIONES TRIFASICAS EN PARALELO

Para que las conexiones trifásicas puedan funcionar en paralelo se tiene que cumplir lo siguiente:

- Las relaciones de los voltajes de línea de las conexiones trifásicas tienen que ser iguales.
- Los voltajes de línea de los secundarios de las conexiones trifásicas tienen que estar en fase.

Así se tiene los siguientes casos:

a. DOS CONEXIONES TRIFASICAS ESTRELLA - ESTRELLA

En la Fig. 3.33 se presentan dos conexiones trifásicas estrella – estrella T' y T'' y se procede a demostrar si pueden operar en paralelo.

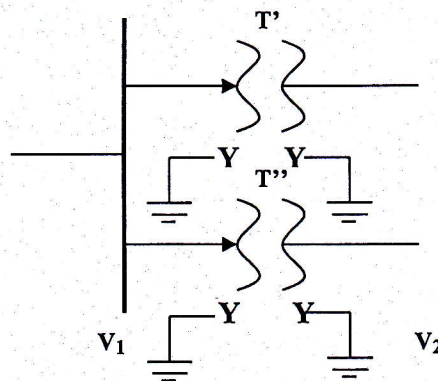


Fig. 3.33 DOS CONEXIONES TRIFASICAS

Las dos conexiones trifásicas estrella – estrella T' y T'' cumplen con la condición que las relaciones de los voltajes de línea son iguales:

$$\left(\frac{V_1}{V_2} \right)_{T'} = \left(\frac{V_1}{V_2} \right)_{T''}$$

Para demostrar que los voltajes de línea de los secundarios de las conexiones trifásicas T' y T'' están en fase se tiene que realizar los diagramas fasoriales respectivos.

En la Fig. 3.34 se presentan dos conexiones trifásicas estrella-estrella que tienen conectados los primarios a las mismas barras y los secundarios están libres hasta demostrar que se pueden conectar en paralelo, para lo cual se utilizan los diagramas fasoriales de los voltajes de línea de los respectivos secundarios.

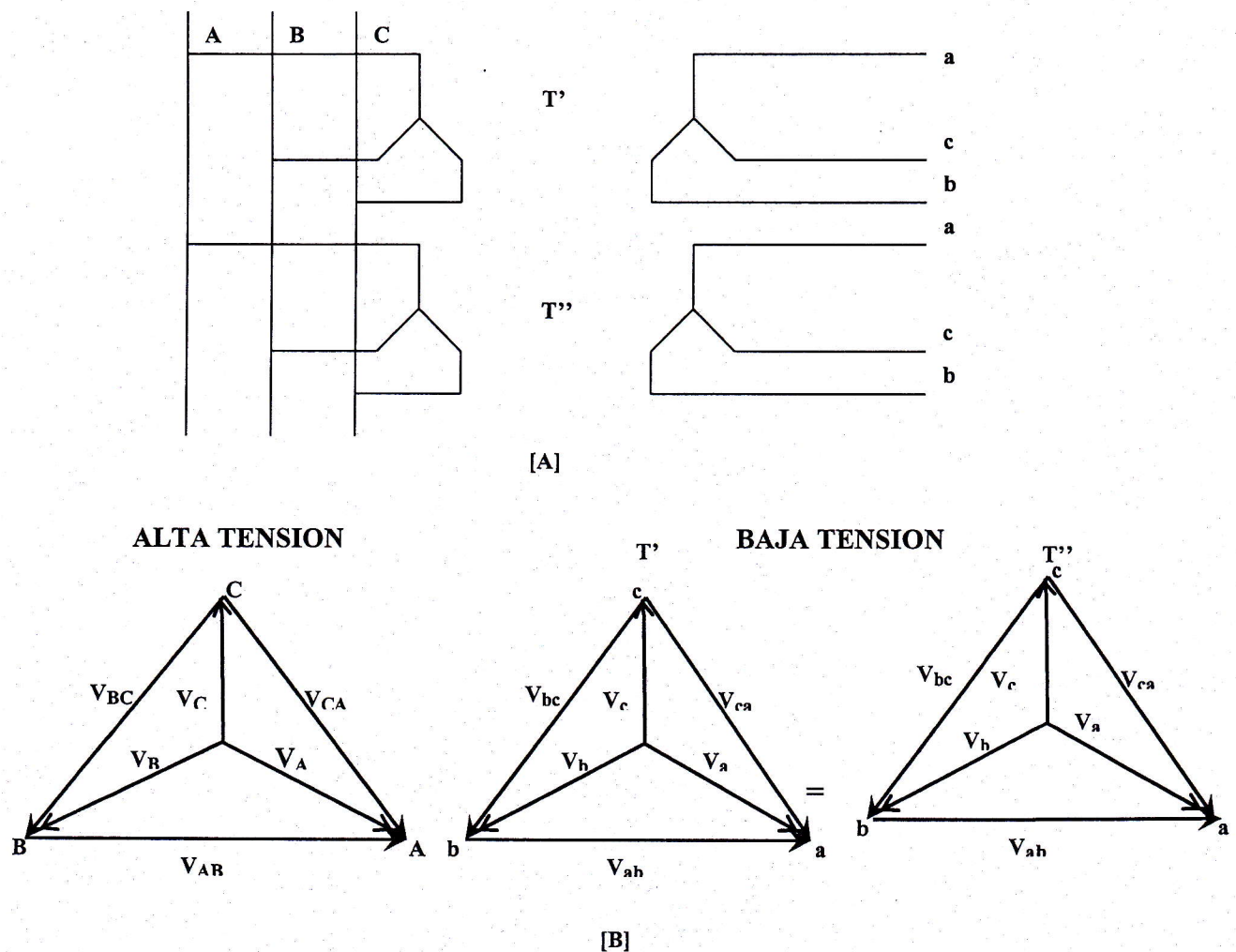


Fig. 3.34 DOS CONEXIONES TRIFASICAS
[A] DOS CONEXIONES ESTRELLA-ESTRELLA
[B] DIAGRAMAS FASORIALES DE LOS VOLTAJES

Como los diagramas fasoriales de los voltajes de línea de los secundarios están en fase, las dos conexiones trifásicas estrella – estrella T' y T'' se pueden conectar en paralelo.

3.4 CONEXIONES TRIFASICAS EN PARALELO

Para que las conexiones trifásicas puedan funcionar en paralelo se tiene que cumplir lo siguiente:

- Las relaciones de los voltajes de línea de las conexiones trifásicas tienen que ser iguales.
- Los voltajes de línea de los secundarios de las conexiones trifásicas tienen que estar en fase.

Así se tiene los siguientes casos:

a. DOS CONEXIONES TRIFASICAS ESTRELLA - ESTRELLA

En la Fig. 3.33 se presentan dos conexiones trifásicas estrella – estrella T' y T'' y se procede a demostrar si pueden operar en paralelo.

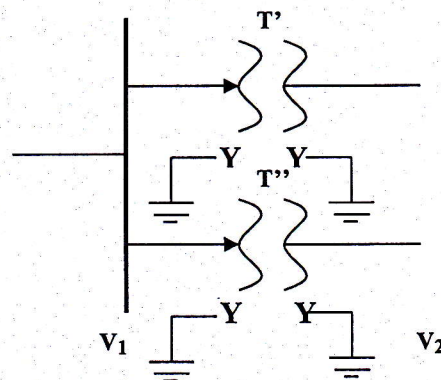


Fig. 3.33 DOS CONEXIONES TRIFASICAS

Las dos conexiones trifásicas estrella – estrella T' y T'' cumplen con la condición que las relaciones de los voltajes de línea son iguales:

$$\left(\frac{V_1}{V_2} \right)_{T'} = \left(\frac{V_1}{V_2} \right)_{T''}$$

Para demostrar que los voltajes de línea de los secundarios de las conexiones trifásicas T' y T'' están en fase se tiene que realizar los diagramas fasoriales respectivos.

En la Fig. 3.34 se presentan dos conexiones trifásicas estrella-estrella que tienen conectados los primarios a las mismas barras y los secundarios están libres hasta demostrar que se pueden conectar en paralelo, para lo cual se utilizan los diagramas fasoriales de los voltajes de línea de los respectivos secundarios.

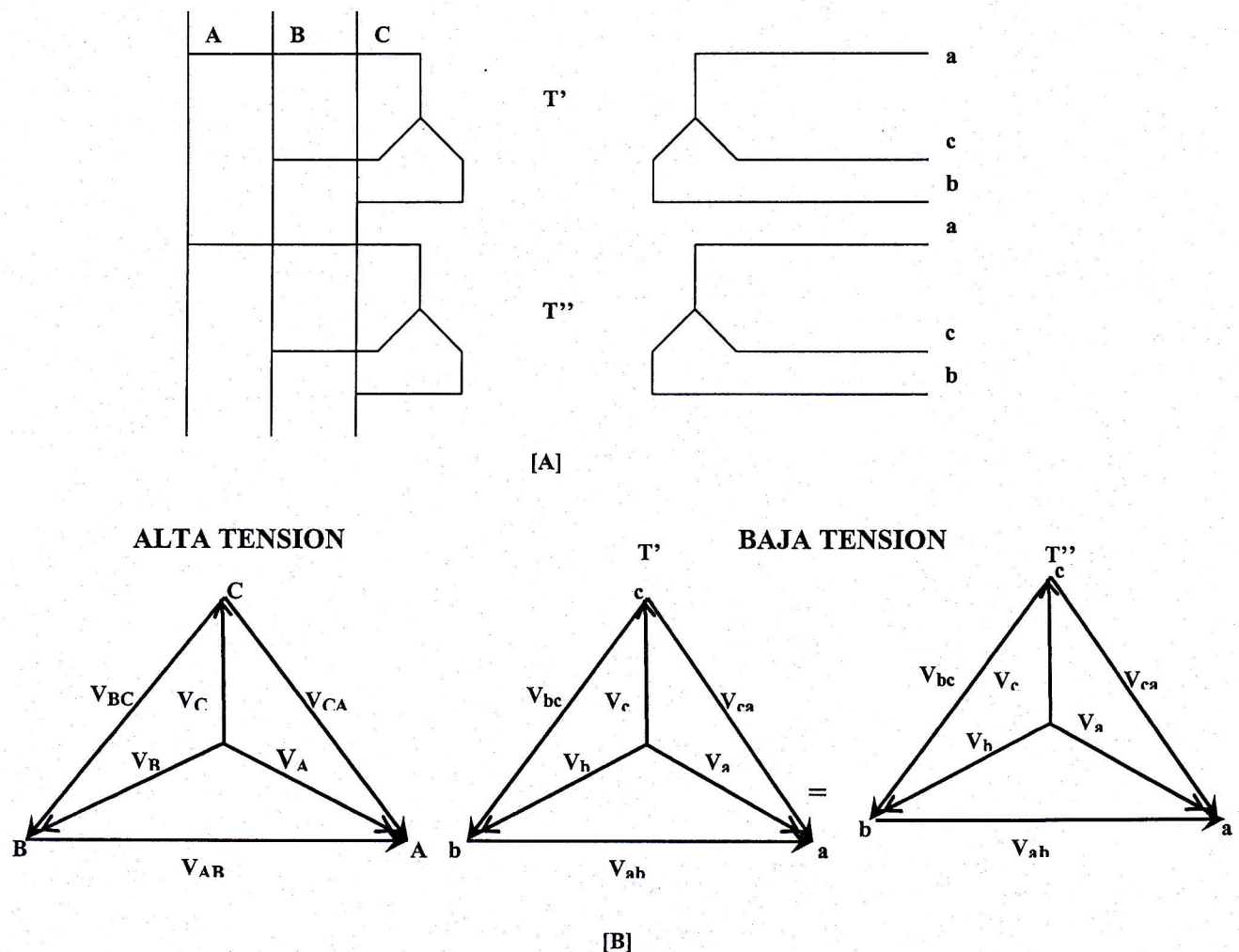


Fig. 3.34 DOS CONEXIONES TRIFASICAS
[A] DOS CONEXIONES ESTRELLA-ESTRELLA
[B] DIAGRAMAS FASORIALES DE LOS VOLTAJES

Como los diagramas fasoriales de los voltajes de línea de los secundarios están en fase, las dos conexiones trifásicas estrella – estrella T' y T'' se pueden conectar en paralelo.

b. DOS CONEXIONES TRIFÁSICAS: UNA ESTRELLA – ESTRELLA Y LA OTRA DELTA - DELTA

En la figura 3.35 se presentan dos conexiones trifásicas una estrella – estrella T' y la otra delta – delta T'' y se procede a demostrar si pueden operar en paralelo.

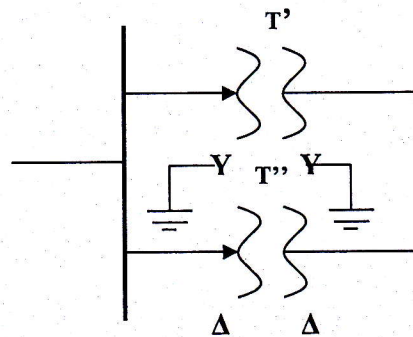


Fig. 3.35 DOS CONEXIONES TRIFÁSICAS

Las dos conexiones trifásicas estrella – estrella T' y delta – delta T'' cumplen con la condición que las relaciones de los voltajes de línea son iguales:

$$\left(\frac{V_1}{V_2} \right)_{T'} = \left(\frac{V_1}{V_2} \right)_{T''}$$

Para demostrar que los voltajes de línea de los secundarios de las conexiones trifásicas T' y T'' están en fase se tiene que realizar los diagramas fasoriales respectivos.

En la Fig. 3.36 se presentan dos conexiones trifásicas estrella – estrella y delta – delta que tienen conectados los primarios a las mismas barras y los secundarios libres hasta demostrar que se pueden conectar en paralelo, para lo cual se utilizan los diagrama fasoriales de los voltajes de línea de los respectivos secundarios.

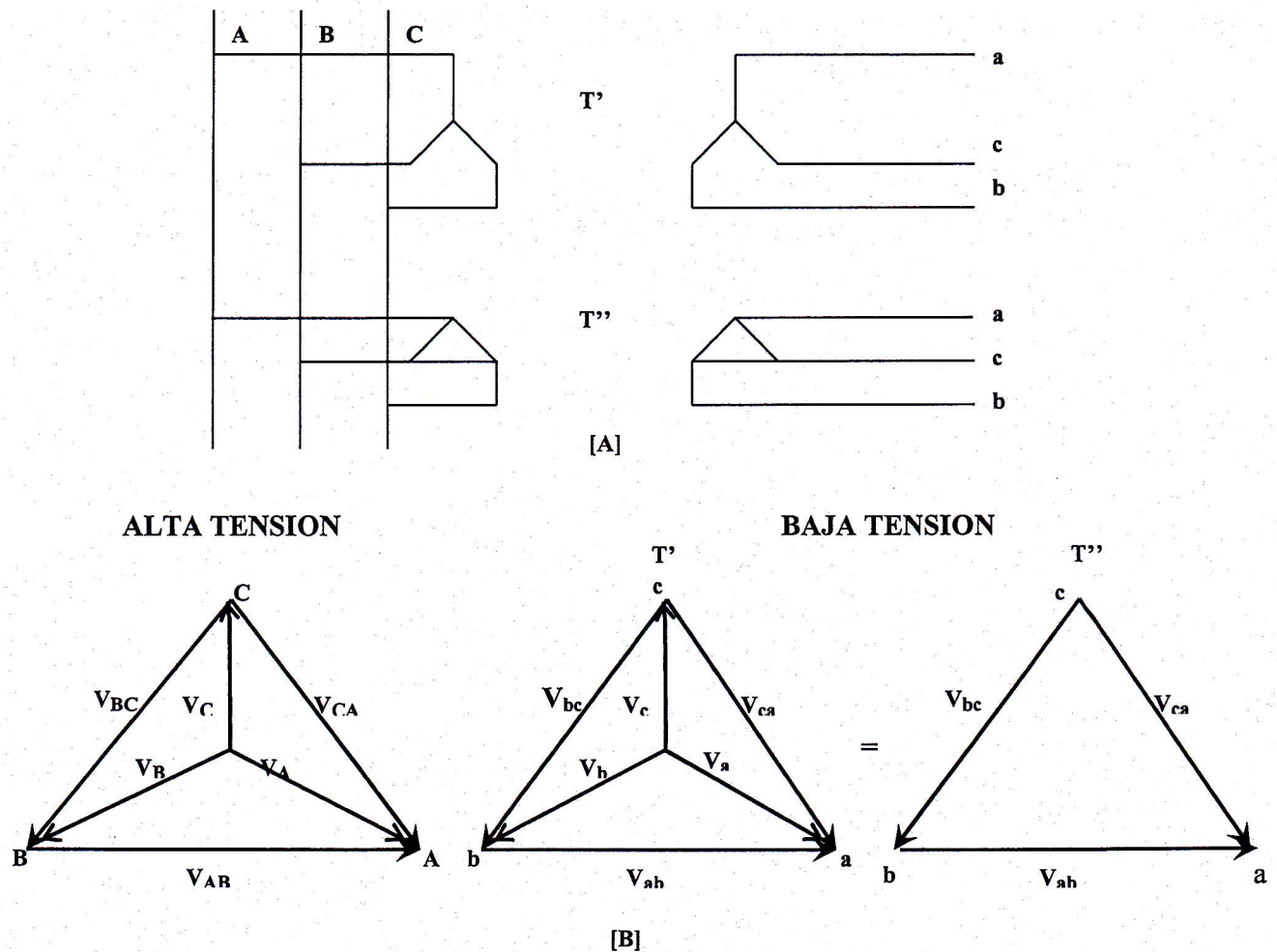


Fig. 3.36 DOS CONEXIONES TRIFASICAS

[A] UNA CONEXION ESTRELLA-ESTRELLA Y OTRA DELTA-DELTA

[B] DIAGRAMAS FASORIALES DE LOS VOLTAJES

Como los diagrama fasoriales de los voltajes de línea de los secundarios están en fase las dos conexiones trifásicas estrella – estrella T' y delta – delta T'' se pueden conectar en paralelo.

c. DOS CONEXIONES TRIFASICAS: UNA ESTRELLA – ESTRELLA Y LA OTRA ESTRELLA – DELTA

En la figura 3.37 se presentan dos conexiones trifásicas una estrella – estrella T' y la otra estrella – delta T'' y se procede a demostrar si pueden operar en paralelo.

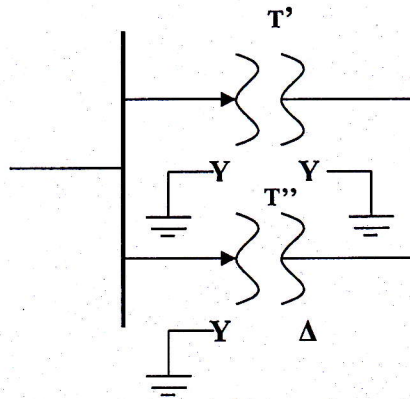


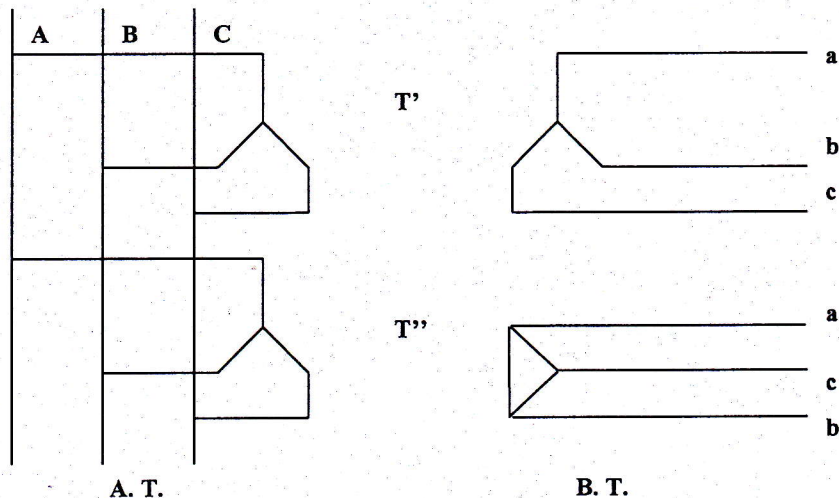
Fig. 3.37 DOS CONEXIONES TRIFASICAS

Las dos conexiones trifásicas estrella – estrella T' y estrella – delta T'' cumplen con la condición que las relaciones de voltajes de línea son iguales:

$$\left(\frac{V_1}{V_2} \right)_{T'} = \left(\frac{V_1}{V_2} \right)_{T''}$$

Para demostrar que los voltajes de línea de los secundarios de las conexiones trifásicas T' y T'' están en fase se tiene que realizar los diagramas fasoriales respectivos.

En la figura 3.38 se presentan dos conexiones trifásicas estrella – estrella y estrella – delta que tienen conectados los primarios a las mismas barras y los secundarios libres hasta demostrar que se pueden conectar en paralelo, para lo cual se utilizan los diagramas fasoriales de los voltajes de línea de los respectivos secundarios.



[A]

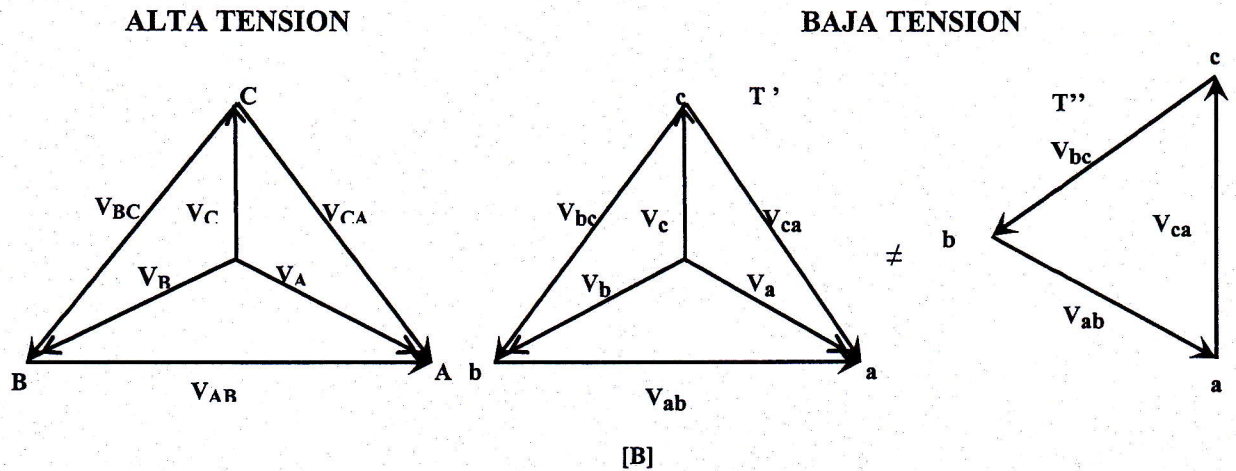


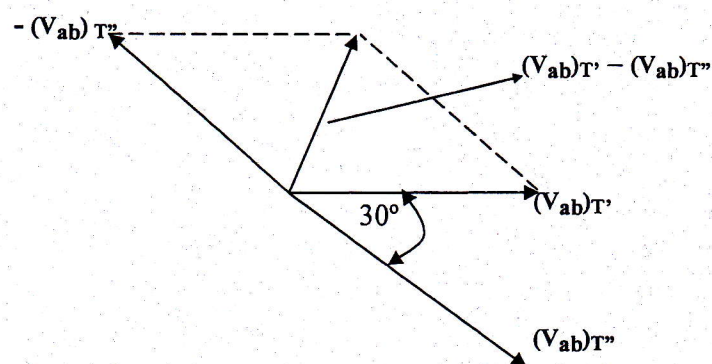
Fig. 3.38 DOS CONEXIONES TRIFASICAS
[A] UNA CONEXION ESTRELLA-ESTRELLA Y OTRA ESTRELLA-DELTA
[B] DIAGRAMAS FASORIALES DE LOS VOLTAJES

Cuando los voltajes de línea de los secundarios están en fase se tiene que cumplir:

$$(V_{ab})_{T'} = (V_{ab})_{T''}$$

$$(V_{ab})_{T'} - (V_{ab})_{T''} = 0$$

Pero en las dos conexiones trifásicas estrella – estrella T' y estrella – delta T'' se tiene lo siguiente:



Como los diagramas fasoriales de los voltajes de línea de los secundarios no están en fase, las dos conexiones trifásicas estrella – estrella T' y estrella – delta T'' no se pueden conectar en paralelo.

TEORIA Y PROBLEMAS DE APLICACIONES DE LOS TRANSFORMADORES

CAPITULO IV TRANSFORMADORES DE MEDICIONES

4.1 TRANSFORMADOR DE TENSION

Para medir el voltaje en los sistemas eléctricos se utiliza el transformador de tensión. Así en la Fig. 4.1 se presenta un generador eléctrico de 13.8KV, al cual se le conecta un transformador de tensión para medir su voltaje.

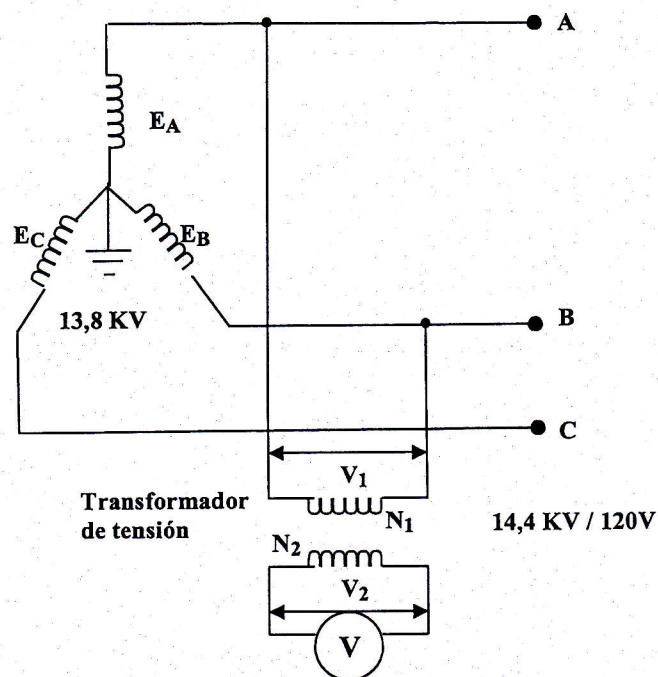


Fig. 4.1 TRANSFORMADOR DE TENSION CONECTADO A UN GENERADOR ELECTRICO

El voltaje de línea del generador es igual a:

$$V_{AB} = \left(\frac{14,4 \times 10^3}{120} \right) \times V_2$$

y V_{AB} será más exacto si: $\frac{V_1}{V_2}$ es más próximo a $\frac{N_1}{N_2}$

Esto depende de lo siguiente:

- De las impedancias de dispersión del transformador de tensión.
- De la carga del transformador de tensión.
- De la corriente de excitación del transformador de tensión.

En la Fig. 4.2 se presentan los circuitos eléctricos del primario y secundario del transformador de tensión.

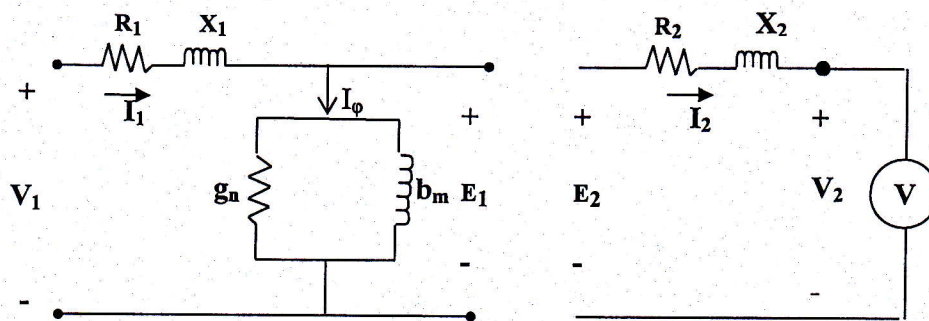


Fig. 4.2 CIRCUITOS ELECTRICOS DEL TRANSFORMADOR DE TENSION

La relación exacta es la de las fems del primario y secundario:

$$\frac{E_1}{E_2} = \frac{N_1}{N_2}$$

La relación de los voltajes terminales del primario y secundario es:

$$\frac{V_1}{V_2} = \frac{E_1 + I_1(R_1 + jX_1)}{E_2 - I_2(R_2 + jX_2)}$$

Para que se cumpla:

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

Depende de las magnitudes de las caídas de tensión de las impedancias de dispersión:

$$I_1 (R_1 + jX_1)$$

$$I_2 (R_2 + jX_2)$$

Para que las caídas de tensión en las impedancias de dispersión sean mínimas se requiere que las magnitudes de las impedancias de dispersión, la carga y la corriente de excitación sean mínimas.

IMPEDANCIAS DE DISPERSION DEL TRANSFORMADOR DE TENSION

Para que las impedancias de dispersión sean pequeñas se requiere que las resistencias R_1 y R_2 y las reactancias X_1 y X_2 de los devanados primario y secundario sean mínimas para lo cual:

$$R_1 = \ell \frac{l_1}{A_1}$$

$$R_2 = \ell \frac{l_2}{A_2}$$

La resistividad del cobre tiene que ser mínima, las longitudes de los devanados del primario y secundario tienen que ser cortas y el área transversal del conductor del primario y secundario tiene que ser el adecuado.

Para que las reactancias sean mínimas se requiere que los flujos de dispersión del primario y secundario Φ_1 y Φ_2 sean mínimos:

$$L_1 = \frac{N_1 \Phi_1}{I_1}$$

$$L_2 = \frac{N_2 \Phi_2}{I_2}$$

$$X_1 = 2\pi f L_1$$

$$X_2 = 2\pi f L_2$$

CARGA DEL TRANSFORMADOR DE TENSION

Para que la corriente de carga I_2 sea mínima, la carga del transformador de tensión debe ser la adecuada.

CORRIENTE DE EXCITACION DEL TRANSFORMADOR DE TENSION.

La corriente de excitación del transformador de tensión produce la caída de tensión:

$$I_{\phi}(R_1 + jX_1)$$

Por lo cual la corriente de excitación tiene que ser mínima, es decir el acero magnético del núcleo del transformador de tensión tiene que ser de buena calidad.

4.2 TRANSFORMADOR DE CORRIENTE

Para medir la corriente en los sistemas eléctricos se utiliza el transformador de corriente. Así en la Fig. 4.3 se presenta un generador eléctrico de 13.8 KV, al cual se le conecta un transformador de corriente para medir su amperaje.

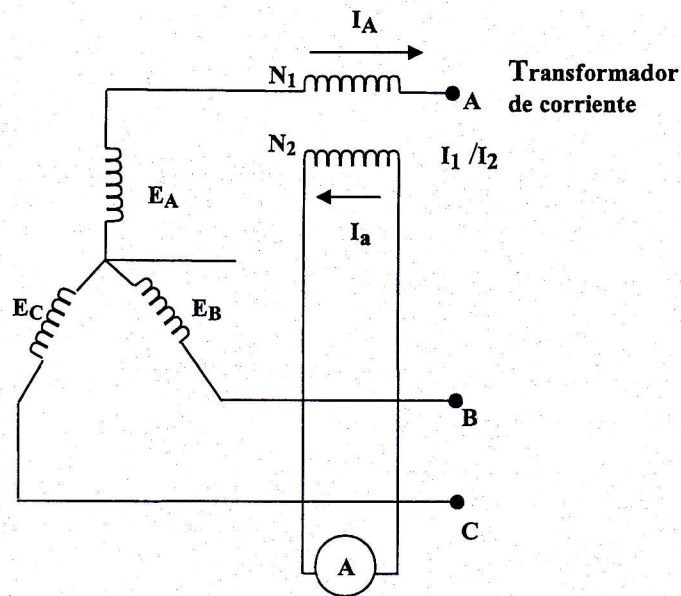


Fig. 4.3 TRANSFORMADOR DE CORRIENTE CONECTADO A UN GENERADOR ELECTRICO

La corriente de línea del generador es igual a:

$$I_A = \frac{I_1}{I_2} \times I_a$$

y I_A será más exacta si:

$$\frac{I_1}{I_2} \text{ es más próximo a } \frac{N_2}{N_1}$$

Esto depende de la corriente de excitación I_ϕ del transformador de corriente.

La teoría de los transformadores indica que la fmm de excitación $N_1 I_\phi$ es igual a la suma de las fmm's del primario $N_1 I_1$ y del secundario $N_2 I_2$:

$$N_1 I_1 + N_2 I_2 = N_1 I_\phi$$

La corriente de excitación I_ϕ debe ser lo más pequeña posible para:

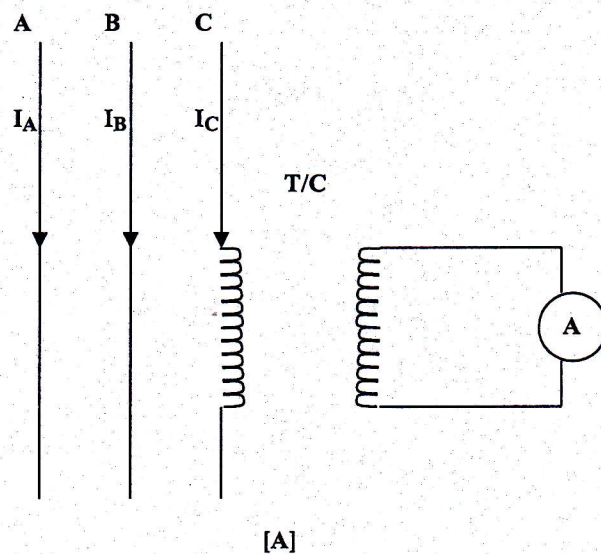
$$|N_1 I_1| \approx |N_2 I_2|$$

y con esto:

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{N_2}{N_1}$$

TRANSFORMADOR DE CORRIENTE EN VACIO

En la Fig. 4.4 se presenta un transformador de corriente para medir el amperaje de la fase C de un sistema eléctrico trifásico.



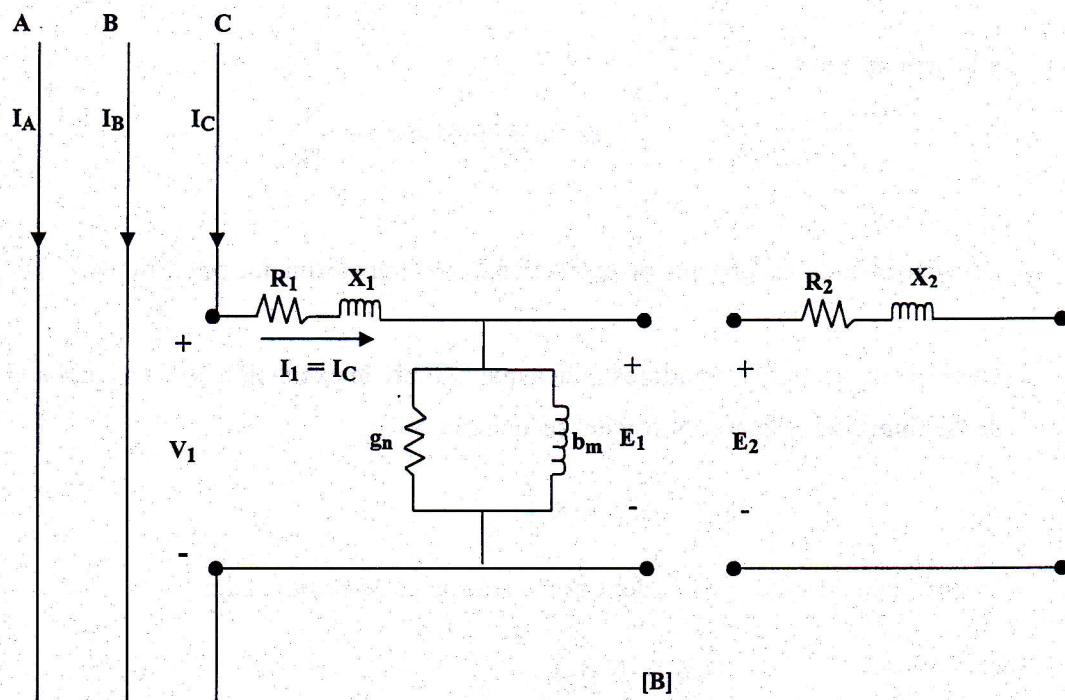


Fig. 4.4 TRANSFORMADOR DE CORRIENTE CONECTADO A UN SISTEMA ELECTRICO
[A] EL TRANSFORMADOR DE CORRIENTE CONECTADO A LA FASE C
[B] CIRCUITOS ELECTRICOS DEL TRANSFORMADOR DE CORRIENTE

Cuando existe corriente en el primario del transformador de corriente, no debe dejarse el secundario en vacío por lo siguiente:

$$I_1 = I_C$$

$$Z_\phi \gg Z_1$$

Por lo tanto la fem E_1 es alta:

$$E_1 = I_1 Z_\phi$$

Además:

$$|I_1 N_1| = |I_2 N_2|$$

$$I_1 > I_2$$

$$N_1 < N_2$$

$$\frac{E_1}{E_2} = \frac{N_1}{N_2}$$

$$E_2 = \frac{N_2}{N_1} E_1$$

Por lo indicado en el devanado secundario del transformador de corriente la fem E_2 se hace mucho más grande y es un voltaje peligroso para la vida humana y para el aislamiento del transformador.

Por lo tanto es necesario que al desconectar el Amperímetro se tiene que cortocircuitar primero el secundario del transformador de corriente, tal como se presenta en la Fig. 4.5.

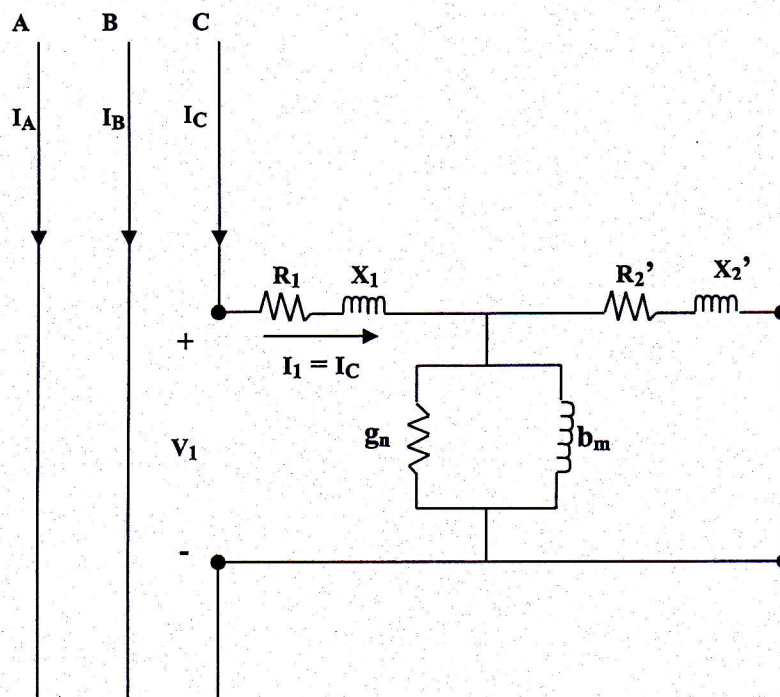


Fig. 4.5 CIRCUITO EQUIVALENTE TRANSFORMADOR DE CORRIENTE EN VACIO Y CORTOCIRCUITADO