

UNIVERSIDAD DE CHILE
DEPARTAMENTO DE INGENIERIA ELECTRICA
Oficina de Publicaciones Docentes

621.314
D419t
1996
C/4
C-6

TRANSFORMADORES

UNIVERSIDAD DE CHILE
BIBLIOTECA
DEPARTAMENTO DE
INGENIERIA ELECTRICA

237 - 9588

Publicación C/4
SANTIAGO - CHILE
1996

COMISION EDITORA:

Efraín Asenjo S.
Carlos Donoso Z.
Alain Hermosilla J.
Nelson Morales O.
Alfreso Muñoz R.
Rodolfo Palma Z.
Jorge Romo L.

CONTENIDO

Editado por:

Oficina de Publicaciones Docentes
DEPARTAMENTO DE INGENIERIA ELECTRICA
UNIVERSIDAD DE CHILE

Av. Tupper 2007
Casilla 412-3
Santiago - Chile
Teléfono: 6982071 Anexos 191 ó 202

621.314

- Transformadores.

(Encargado de Publicaciones: Jorge Romo L.)

TRANSFORMADORES MONOFÁSICOS DE DOS ENROLLADOS

CONTENIDO

1.- INTRODUCCION

2.- PRINCIPIOS BÁSICOS

2.1.- DETALLES

- "Transformadores monofásicos de dos enrollados";
N. Morales, J. Romo
- "Transformadores de varios enrollados"; N. Morales,
R. Palma
- "Conexiones trifásicas de transformadores"; R. Palma,
A. Muñoz
- "Conexión en paralelo de transformadores monofásicos
y trifásicos"; N. Morales, R. Palma
- "Autotransformadores"; C. Donoso, E. Asenjo
- "Transformadores de medida"; A. Hermosilla, R. Palma

TRANSFORMADORES MONOFASICOS DE DOS ENROLLADOS

CONTENIDO

- 1.- INTRODUCCION
- 2.- PRINCIPIOS BASICOS
- 3.- DETALLES CONSTRUCTIVOS
 - 3.1.- Núcleo
 - 3.2.- Bobinas
 - 3.3.- Refrigeración
- 4.- TEORIA DEL TRANSFORMADOR REAL
 - 4.1.- Convención de sentidos ✓
 - 4.2.- Flujo común y flujos de fuga ✓
 - 4.3.- Relaciones de voltajes y corrientes ✓
 - 4.4.- Diagrama fasorial ✓
 - 4.5.- Circuito equivalente ✓
 - 4.6.- Efecto de las pérdidas en el fierro y la saturación ✓
 - 4.7.- Corriente de conexión •
 - 4.8.- Resistencia efectiva en corriente alterna; pérdidas adicionales ✓
 - 4.9.- Polaridad •
 - 4.10.- Regulación de voltaje •
 - 4.11.- Rendimiento •
- 5.- ENSAYOS DE TRANSFORMADORES
 - 5.1.- Medida de la resistencia óhmica de los enrollados ✓
 - 5.2.- Medida de la razón de transformación ✓
 - 5.3.- Prueba de polaridad •
 - 5.4.- Pruebas de circuito abierto y de cortocircuito ✓
 - 5.5.- Prueba de rendimiento •
 - 5.6.- Prueba de regulación •
 - 5.7.- Pruebas de calentamiento. •
- 6.- BIBLIOGRAFIA

TRANSFORMADORES MONOFASICOS DE DOS ENROLLADOS

1.- INTRODUCCION.

El transformador es una máquina eléctrica estática, que opera exclusivamente en corriente alterna, recibiendo energía a un cierto nivel de tensión y corriente y entregándola a otro nivel de tensión y corriente, con pocas pérdidas.

Al transformador se debe en gran parte el extenso uso de la corriente alterna en los sistemas de potencia; permite que la generación eléctrica se efectúe al voltaje de generación más económico, la transferencia de potencia al voltaje de transmisión más económico, y luego utilizar la energía al voltaje que resulte más adecuado para cada uso específico. El transformador se utiliza también en los circuitos electrónicos y de control, (de baja potencia y baja corriente) para realizar funciones tales como: aislar un circuito de otro, aislar la corriente continua mientras se mantiene la continuidad de la corriente alterna entre dos circuitos, etc.

En esta publicación se describen los principios de funcionamiento y algunos detalles constructivos de transformadores monofásicos. Además se deduce el circuito equivalente y las relaciones de comportamiento, y se explican las pruebas tradicionales.

2.- PRINCIPIOS BASICOS.

Un transformador consta esencialmente de dos o más enrollados enlazados por un flujo magnético mutuo (ver Fig. 1).

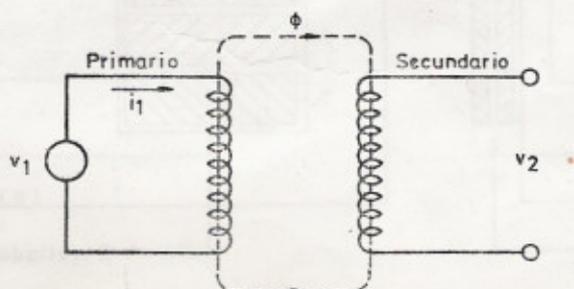


Figura 1. Esquema básico de la acción de transformador.

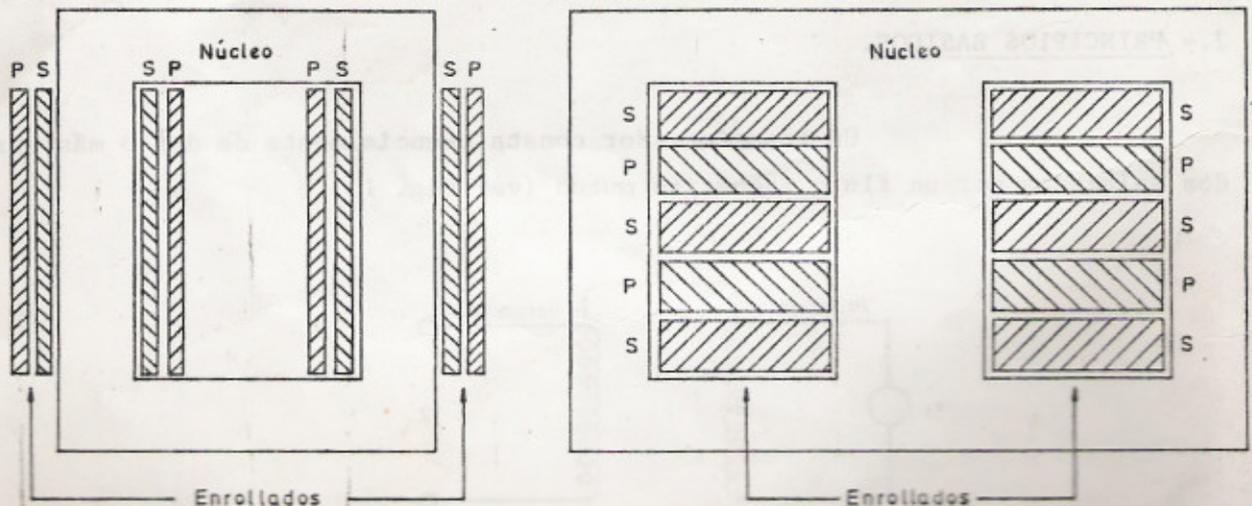
Si uno de estos enrollados, que en adelante se designará como primario, se conecta a una fuente de tensión alterna, circula por él una corriente, que a su vez genera un flujo cuya magnitud dependerá del voltaje aplicado y del número de vueltas del enrollado. Parte de este flujo enlaza al otro enrollado, que recibirá el nombre de secundario, induciendo en él una tensión cuya magnitud depende del número de vueltas del secundario. Eligiendo en forma adecuada el número de vueltas del primario y del secundario, se puede obtener la relación de voltajes o "razón de transformación" deseada para el traspaso de energía.

Para que se produzca el efecto de transformación sólo se requiere disponer de un flujo alterno que enlace a ambos enrollados (flujo mutuo). Este efecto puede conseguirse mediante un núcleo de aire, sin embargo se obtendrá un resultado mucho más satisfactorio con un núcleo de hierro o de otro material ferromagnético, pues el flujo queda así confinado en un circuito bien determinado y de alta permeabilidad que enlaza a ambos enrollados. Un transformador así constituido recibe el nombre de "transformador de núcleo de hierro". Siendo la mayoría de los transformadores de este tipo, la discusión siguiente se limitará a él.

3.- DETALLES CONSTRUCTIVOS.

3.1.- Núcleo.

Para disminuir las pérdidas en el hierro, el circuito magnético o núcleo se construye de láminas delgadas aisladas unas de otras por un barniz adecuado. Según la forma del circuito magnético, los transformadores pueden clasificarse en dos tipos (ver Fig. 2). En el "tipo núcleo" (core) (Fig. 2(a)),



a) Enrollado tipo núcleo

b) Enrollado tipo acorazado

las bobinas se encuentran enrolladas en torno a dos piernas de un núcleo magnético de forma rectangular; en el "tipo acorazado" (shell) (Fig. 2(b)) las bobinas se enrollan en torno a la pierna central de un núcleo de 3 piernas. En transformadores destinados a trabajar con frecuencia hasta algunos cientos de ciclos por segundo, se utilizan láminas de fierro silicoso; el fierro silicoso tiene las ventajas de ser económico, de tener pocas pérdidas y una gran permeabilidad a altas densidades de flujo. Los núcleos de los pequeños transformadores utilizados en circuitos de comunicaciones a altas frecuencias y bajos niveles de energía, suelen construirse de aleaciones ferromagnéticas, tales como el Permalloy, pulverizadas y comprimidas.

100

En general debido a los procesos constructivos de los transformadores, tanto pequeños como grandes, es necesario que el circuito magnético esté abierto mientras se construye el transformador por lo cual no se pueden utilizar láminas de una sola pieza. Hay que tener cuidado, sin embargo, en que no coincidan las uniones de dos láminas vecinas; para ello se alternan las láminas vecinas en las formas (a) y (b) de la Fig. 3, que muestran un ejemplo de disposición adoptada para un transformador monofásico tipo núcleo. Sin este alternado de las uniones, se producirían cortocircuitos entre las láminas que aumentarían las pérdidas por corrientes de Foucault. Además, esta disposición entrelaza las láminas y permite apretar el paquete simplemente mediante pernos y tuercas. Los pernos de apretado se rodean con un manguito aislante y las tuercas se colocan sobre golillas también aislantes para evitar cortocircuitos entre láminas.

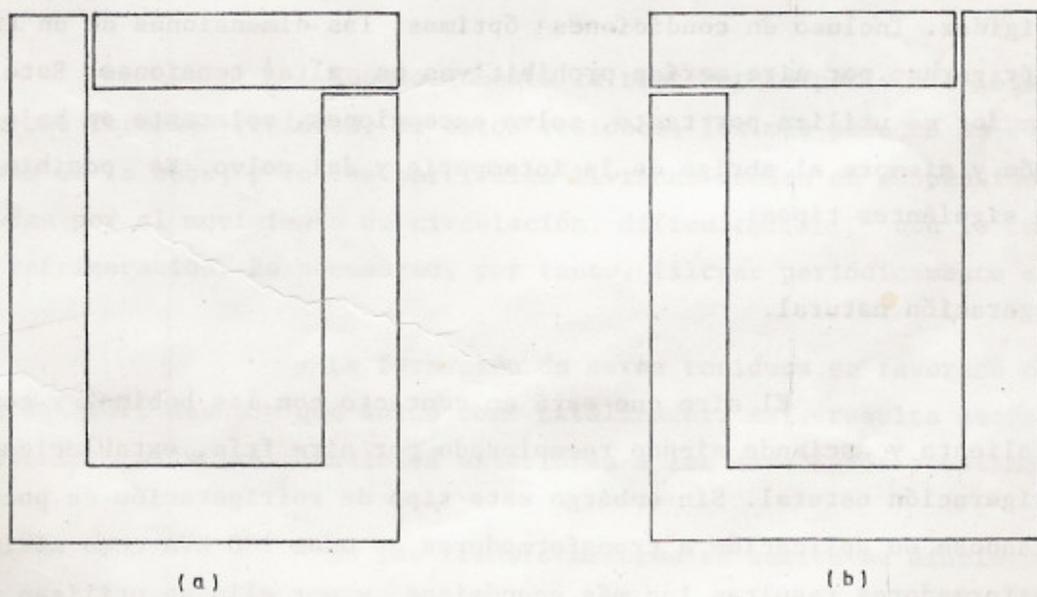


Figura 3. Láminas vecinas de transformador tipo núcleo.

EL 40 B BELY 970
BLUC WIL
BM20 PDT

3.2.- Bobinas.

La mayor parte del flujo queda confinado al núcleo enlazando así ambas bobinas. Sin embargo, el flujo de fuga que enlaza sólo uno de los enrollados, a pesar de ser solamente una pequeña fracción del flujo total, tiene una gran importancia en el funcionamiento del transformador. Las fugas se reducen subdividiendo los enrollados en secciones ubicadas lo más cerca posible una de otra. En los transformadores tipo núcleo, cada enrollado está compuesto de dos secciones, colocadas una en cada pierna; los enrollados primario (P) y secundario (S) forman bobinas concéntricas (ver Fig. 2(a)). En los tipos acorazado puede usarse variante del tipo concéntrico, o bien los enrollados pueden estar constituidos por bobinas delgadas ("panqueque") colocadas una encima de otra e intercalando bobinas primarias con secundarias (ver Fig. 2(b)).

3.3.- Refrigeración.

En los transformadores se producen pérdidas en el hierro por histéresis y por corrientes de Foucault, y en el cobre por efecto Joule, las cuales elevan la temperatura del equipo, siendo necesario por tanto refrigerarlos. El tipo de refrigeración permite clasificarlos en:

3.3.1.- Transformadores refrigerados por aire.

El aire es un buen aislante, pero sus características como dieléctrico dependen de su estado: la humedad y las partículas de polvo reducen su rigidez. Incluso en condiciones óptimas, las dimensiones de un transformador refrigerado por aire serían prohibitivas en altas tensiones. Este tipo de transformador se utiliza por tanto, salvo excepciones, solamente en baja y mediana tensión y siempre al abrigo de la intemperie y del polvo. Es posible distinguir los siguientes tipos:

a) Refrigeración natural.

El aire que está en contacto con las bobinas y con el hierro se calienta y asciende siendo reemplazado por aire frío, estableciendo así una refrigeración natural. Sin embargo este tipo de refrigeración es poco efectiva limitándose su aplicación a transformadores de unos 100 KVA como máximo. Estos transformadores resultan los más económicos y por ello se utilizan siempre que sea posible, pero su potencia y su tensión quedan limitadas y deben estar siempre protegidos de la intemperie.

b) Refrigeración forzada.

En este caso un ventilador refrigera el transformador, pero se sigue estando limitado por la tensión. Además, el ventilador que se calcula para la carga nominal no permite más que pequeñas y breves sobrecargas. Este tipo de refrigeración se utiliza pocas veces.

3.3.2.- Transformadores en aceite.

La rigidez dieléctrica del aceite usado para transformadores es 4 veces superior a la del aire a presión atmosférica, lo que permite reducir en esta proporción las distancias del aislamiento. Además el aceite impregna las bobinas y penetra en los huecos dejados por el barniz, asegurando así una buena aislación. Es normal el uso de aislaciones en serie formada por aceite y papel en capas delgadas, aumentando de este modo considerablemente la rigidez dieléctrica del espacio. Se puede así construir transformadores de Extra Alta tensión (sobre 500 KV).

El aceite se encierra en una cuba que sirve al mismo tiempo para proteger los enrollados y permite utilizar estos transformadores a la intemperie.

El aceite para transformadores es un derivado del petróleo, muy fluido, de densidad 0,88 y no contiene trazas de óxidos metálicos, los cuales reducirían mucho sus características como dieléctrico.

Cuando aumenta la temperatura por sobre los 100°C se descompone formando residuos. De estos residuos, los más pesados se depositan en el fondo de la cuba, pero las partículas livianas quedan en suspensión, siendo arrastradas por el movimiento de circulación, dificultándolo, con lo cual disminuye la refrigeración. Es necesario, por tanto, filtrar periódicamente el aceite.

La formación de estos residuos se favorece con la presencia de cobre desnudo que actúa como catalizador. Así, resulta necesario barnizar o estañar todas las conexiones exteriores a los enrollados propiamente tales.

En los transformadores en aceite se distinguen también:

a) Circulación natural.

De la misma forma que en el caso de la refrigeración por

aire, el aceite en contacto con las bobinas y el hierro del circuito magnético se calienta y se produce un movimiento natural (corriente de convección) que favorece la refrigeración. El aceite caliente se vuelve a enfriar a lo largo de las paredes laterales de la cuba que tienen formas onduladas o están provistas de tubos que aumentan la superficie radiante. Esta circulación del aceite presenta también la ventaja de apagar las chispas que pudieran producirse en el interior.

El aceite tiene un elevado calor específico, lo que permite sobrecargas importantes y prolongadas, sin peligro. Estos transformadores no necesitan ninguna vigilancia y resultan de funcionamiento muy seguro; por eso, son los de utilización más frecuente.

b) Circulación forzada.

Para reducir la cantidad de aceite que se precisa por refrigeración, se acelera en este sistema la velocidad de circulación del fluido, mediante una bomba que recoge el aceite caliente de la parte superior y lo envía a refrigerarse a un serpentín bañado por agua fría, inyectándolo a continuación en la base del transformador.

En climas fríos hay que tomar precauciones especiales para que en invierno el frío no reviente el serpentín, ya que cualquier mezcla del agua y el aceite produciría cortocircuitos graves. Es preciso, por tanto, mantener una vigilancia continua ya que el transformador no puede trabajar con la bomba detenida. Por ello este tipo de refrigeración se utiliza mucho menos que el precedente, salvo en el caso de transformadores de gran potencia.

En este último caso se prevé a menudo una circulación natural del aceite hasta los $2/3$ o los $3/4$ de la potencia nominal. Una refrigeración suplementaria producida por ventiladores o por circulación forzada del aceite permite aumentar la potencia del transformador con dimensiones más reducidas que en el caso de confiar la refrigeración exclusivamente a la circulación natural.

3.3.3.- Empleo de otros tipos de aislación.

Los transformadores en baño de aceite presentan peligros de incendio y explosión; ante estos riesgos, se ha buscado otras formas de aislación que eliminen este peligro, cumpliendo además las funciones de refrigeración:

a) Transformadores de piraleno.

El piraleno es un derivado del benceno que presenta cualidades análogas al aceite en cuanto a calor específico y rigidez dieléctrica. Pero la cualidad más interesante del piraleno es la de no ser inflamable, aparte de otras ventajas respecto al aceite, que pueden apreciarse en la Tabla 1.

	Piraleno	Aceite
Calor específico	0,40	0,45
Rigidez dieléctrica (U.T.E.)	40 KV	40 KV
Punto de congelación	-30 °C	- 5 °C
Constante dieléctrica	4,15	2,2
Depósito (125 hrs. a 150 °C)	Ninguno	0,02 %

TABLA 1

Esta técnica de los transformadores de piraleno ha exigido paralelamente la fabricación de aislantes que no sean atacados por el piraleno. Con los perfeccionamientos recientes se ha llegado ya a aislantes prácticamente inatacables.

b) Transformadores en silicona líquida.

Utilizan como agente aislante un producto líquido a base de silicona dimetílica, mucho menos inflamable que otros tipos de aceites y con más alto grado de extinción. No presenta los riesgos de contaminación ambiental de los aceites sintéticos askareles. Es un poco más pesado que el aceite común.

c) Transformadores secos.

Se ha pensado también en reemplazar el aislante líquido por uno en estado sólido. Se utilizan con este fin una mezcla de resina epóxica y harina de cuarzo, eliminando totalmente las emanaciones gaseosas. Es evidente que cualquier riesgo de explosión o de incendio desaparece en este tipo de transformadores. Estos transformadores son abiertos y por lo tanto refrigerados por aire.

4.- TEORIA DEL TRANSFORMADOR REAL.

4.1.- Convención de sentidos.

En la Fig. 4 se esquematiza un transformador de dos enro- llados cuyas vueltas respectivas son N_1 y N_2 , donde se ha indicado el sentido convencional de las corrientes (i_1 , i_2) y voltajes (v_1 , v_2) instantáneos en am- bos enrollados.

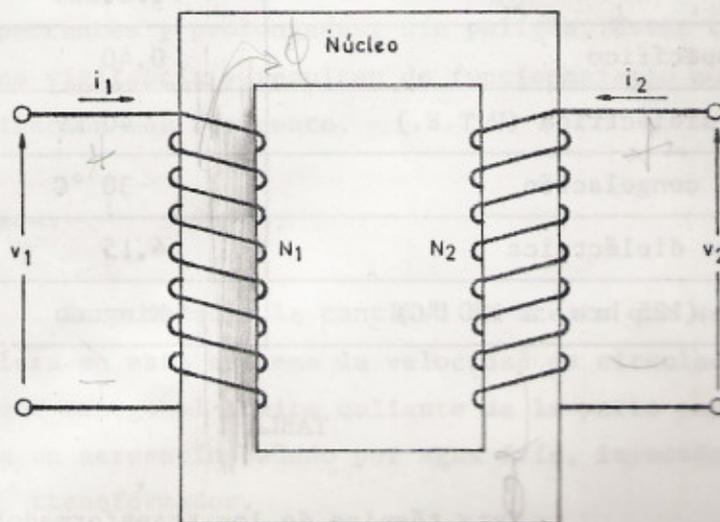


Figura 4. Convención de sentidos.

4.2.- Flujo común y flujo de fuga.

Al circular una corriente i_1 por el enrollado 1, éste que dará enlazado por un flujo debido a la fuerza magnetomotriz (f.m.m.) $N_1 i_1$, flujo que a su vez será enlazado en gran parte por el enrollado 2.

Se designará por ϕ_{m1} a la parte del flujo que es enlazado tanto por 1 como por 2 (flujo mutuo producido por la corriente i_1), y por ϕ_{f1} a la parte del flujo que sólo es enlazada por 1.

Entonces ϕ_{m1} y ϕ_{f1} estarán dados por:

$$\phi_{m1} = \frac{N_1 i_1}{\mathcal{R}_{m1}} \tag{1}$$

$$\phi_{f1} = \frac{N_1 i_1}{\mathcal{R}_{f1}} \tag{2}$$

Siendo R_{m1} la reluctancia del circuito magnético recorrido por el flujo ϕ_{m1} y R_{f1} la reluctancia del circuito magnético recorrido por ϕ_{f1} .

Del mismo modo, al circular una corriente i_2 por el enrollado 2, se tiene los siguientes flujos enlazados:

ϕ_{m2} : parte del flujo que es enlazado tanto por 2 como por 1, y

ϕ_{f2} : parte del flujo que sólo se enlaza por 2.

Tanto ϕ_{m2} como ϕ_{f2} están dados por:

$$\phi_{m2} = \frac{N_2 i_2}{R_{m2}} \tag{3}$$

$$\phi_{f2} = \frac{N_2 i_2}{R_{f2}} \tag{4}$$

Siendo R_{m2} la reluctancia del circuito magnético recorrido por ϕ_{m2} y R_{f2} la del circuito magnético recorrido por ϕ_{f2} .

Puesto que ϕ_{m1} y ϕ_{m2} son enlazados por ambos enrollados, el circuito magnético que recorren será el mismo y por lo tanto existirá una reluctancia R_m para ambos flujos mutuos ($R_{m1} = R_{m2} = R_m$).

Si ahora circulan simultáneamente i_1 por 1 e i_2 por 2, se tendrá (Fig. 5) un flujo ϕ_m común a ambos enrollados:

$$\phi_m = \frac{1}{R_m} (N_1 i_1 + N_2 i_2) = \phi_{m1} + \phi_{m2} \tag{5}$$

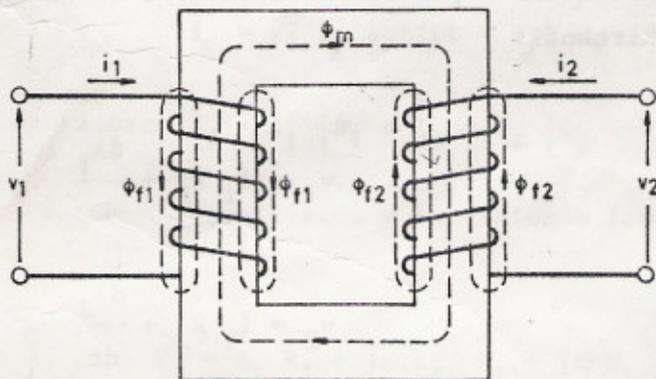


Figura 5. Flujos producidos por circulación de corriente en ambos enrollados.

y además un flujo ϕ_{f1} que sólo es enlazado por 1 y está dado por la relación (2) y un flujo ϕ_{f2} enlazado por 2 y definido por la relación (4).

ϕ_m recibe el nombre de "flujo mutuo o común" y ϕ_{f1} y ϕ_{f2} corresponden a "flujos de fugas", debido a que no son enlazados por los dos enro- llados.

Es de notar que el flujo común circula por el material magnético del núcleo, en cambio los flujos de fuga circulan casi en su totalidad por el aire, por lo que las reluctancias R_{f1} y R_{f2} serán mucho mayores que R_m . Esto es importante para el análisis del transformador puesto que se puede consi- derar casi siempre lineal la relación entre i_1 y ϕ_{f1} aún para condiciones satura- das del núcleo.

Designando por ϕ_1 y ϕ_2 los flujos totales respectivos de los dos enrollados cuando en ambos circula corriente, se tiene:

$$\phi_1 = \phi_{f1} + \phi_{m1} + \phi_{m2} = \phi_{f1} + \phi_m \quad (6.a)$$

$$\phi_2 = \phi_{f2} + \phi_{m2} + \phi_{m1} = \phi_{f2} + \phi_m \quad (6.b)$$

Los enlaces de flujo de ambos enrollados, λ_1 y λ_2 respec- tivamente, son

$$\lambda_1 = N_1(\phi_1 + \phi_m) \quad (7.a)$$

$$\lambda_2 = N_2(\phi_2 + \phi_m) \quad (7.b)$$

4.3.- Relaciones de voltajes y corrientes.

Si se tiene un voltaje instantáneo v_1 en el primario y un voltaje instantáneo v_2 en el secundario y considerando que R_1 y R_2 son las resis- tencias de los enrollados 1 y 2 respectivamente, se puede escribir, de acuerdo a las leyes de Kirchoff:

$$v_1 = i_1 R_1 + \frac{d\lambda_1}{dt} \quad (8.a)$$

$$v_2 = i_2 R_2 + \frac{d\lambda_2}{dt} \quad (8.b)$$

Reemplazando λ_1 y λ_2 por las expresiones (7), se tiene:

$$v_1 = i_1 R_1 + N_1 \frac{d\phi_{f1}}{dt} + N_1 \frac{d\phi_m}{dt} \quad (9.a)$$

$$v_2 = i_2 R_2 + N_2 \frac{d\phi_{f2}}{dt} + N_2 \frac{d\phi_m}{dt} \quad (9.b)$$

pero, como ϕ_{f1} y ϕ_{f2} son funciones consideradas lineales de i_1 e i_2 , se puede escribir:

$$v_1 = i_1 R_1 + N_1 \frac{d\phi_{f1}}{di_1} \cdot \frac{di_1}{dt} + N_1 \frac{d\phi_m}{dt} \quad (10.a)$$

$$v_2 = i_2 R_2 + N_2 \frac{d\phi_{f2}}{di_2} \cdot \frac{di_2}{dt} + N_2 \frac{d\phi_m}{dt} \quad (10.b)$$

Al coeficiente $N_1 \frac{d\phi_{f1}}{di_1}$ se le denomina L_{f1} o coeficiente de autoinducción de fuga. Análogamente, se define $L_{f2} = N_2 d\phi_{f2}/di_2$.

Luego las ecuaciones (10) quedan:

$$v_1 = i_1 R_1 + L_{f1} \frac{di_1}{dt} + N_1 \frac{d\phi_m}{dt} \quad (11.a)$$

$$v_2 = i_2 R_2 + L_{f2} \frac{di_2}{dt} + N_2 \frac{d\phi_m}{dt} \quad (11.b)$$

Estas ecuaciones se han establecido para los valores instantáneos; como se sabe, es posible establecerlas para fasores siempre que las variables sean funciones sinusoidales periódicas.

Si:

$$i_1 = \sqrt{2} \bar{I}_1 \text{ sen}(\omega t + \theta_1)$$

$$i_2 = \sqrt{2} \bar{I}_2 \text{ sen}(\omega t + \theta_2)$$

se podrán definir los fasores $\dot{I}_1 = \bar{I}_1 \angle \theta_1$ e $\dot{I}_2 = \bar{I}_2 \angle \theta_2$.

Luego reemplazando y escribiendo fasorialmente las ecuaciones (11):

$$\dot{V}_1 = \dot{I}_1 R_1 + j\omega L_{f1} \dot{I}_1 + j\omega N_1 \dot{\phi}_m \quad (12.a)$$

$$\dot{V}_2 = \dot{I}_2 R_2 + j\omega L_{f2} \dot{I}_2 + j\omega N_2 \dot{\phi}_m \quad (12.b)$$

A los coeficientes (ωL_{f1}) y (ωL_{f2}) se les denomina reactancias de fuga de primario y secundario, designándolas por x_{f1} y x_{f2} , respectivamente; $\dot{\phi}_m$ es el valor fasorial del flujo mutuo, cumpliéndose la relación:

$$\mathcal{R}_m \dot{\phi}_m = (N_1 \dot{I}_1 + N_2 \dot{I}_2) \quad (13)$$

siendo $N_1 \dot{I}_1$ y $N_2 \dot{I}_2$ las f.m.m. fasoriales y \mathcal{R}_m la reluctancia mutua. La suma fasorial de las f.m.m. se designará por \dot{F}_m :

$$\dot{F}_m = N_1 \dot{I}_1 + N_2 \dot{I}_2 \quad (14)$$

El factor $j\omega N_1 \dot{\phi}_m$ es una fuerza electromotriz inducida y se denotará por E_1 para el primario y E_2 para el secundario:

$$\dot{E}_1 = j\omega N_1 \dot{\phi}_m \quad (15.a)$$

$$\dot{E}_2 = j\omega N_2 \dot{\phi}_m \quad (15.b)$$

4.4.- Diagrama fasorial.

Dadas las corrientes \dot{I}_1 e \dot{I}_2 en el plano fasorial (Fig. 6) se procede a ubicar las caídas de tensión de las ecuaciones anteriores, a fin de determinar \dot{V}_1 y \dot{V}_2 en magnitud y fase.

En este caso en que se procede gráficamente, es necesario tomar diferentes escalas para representar las magnitudes de las corrientes y los voltajes.

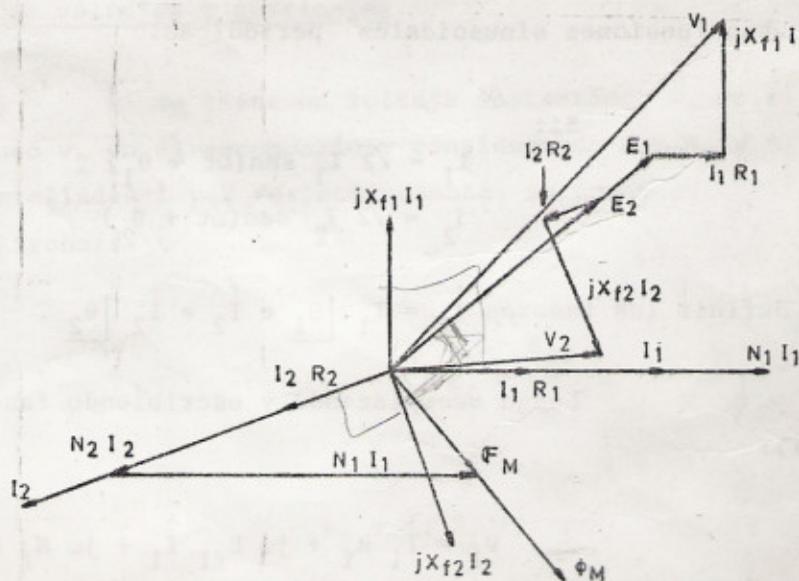


Figura 6. Diagrama fasorial.

Las caídas de tensión en las resistencias están en fase con las corrientes respectivas. A 90° en adelante de ellas se encuentran $X_{f1} I_1$ y $X_{f2} I_2$. Las fuerzas magneto motrices $N_1 I_1$ y $N_2 I_2$ están en fase con las respectivas corrientes y su suma da \mathcal{F}_m . En fase con \mathcal{F}_m se encuentra ϕ_m ; luego a 90° en adelante al flujo ϕ_m se tienen E_1 y E_2 . Una vez obtenidos todos los fasores se procede a la suma vectorial:

$$\dot{V}_1 = R_1 \dot{I}_1 + jX_{f1} \dot{I}_1 + \dot{E}_1 \quad (16.a)$$

$$\dot{V}_2 = R_2 \dot{I}_2 + jX_{f2} \dot{I}_2 + \dot{E}_2 \quad (16.b)$$

4.5.- Circuito equivalente.

El circuito equivalente de un transformador es un circuito eléctrico que representa su comportamiento electromagnético.

Al escribir las ecuaciones de equilibrio de voltajes, ya se ha separado algunos elementos tales como las resistencias R_1 y R_2 del primario y secundario, y las inductancias de fuga L_{f1} y L_{f2} que dan lugar a las reactancias de fuga X_{f1} y X_{f2} . Es posible entonces, como primer paso pensar en un transformador provisto de resistencias y reactancias de fugas (Ver Fig. 7).

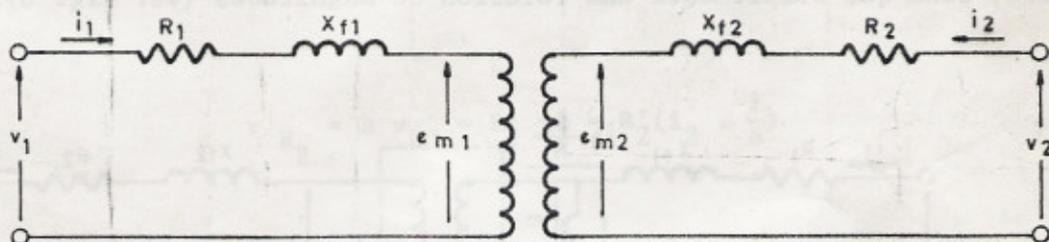


Figura 7. Parámetros serie del transformador.

Pero aún queda la ligazón magnética entre las fuerzas electromotrices E_1 y E_2 . Es posible expresar el efecto de este flujo por una inductancia mutua del circuito 1 (L_{m1}) y definida por:

$$L_{m1} = \frac{N_1 \phi_{m1}}{i_1} = \frac{N_1}{i_1} \left(\frac{N_1 i_1}{\mathcal{R}_M} \right) = \frac{N_1^2}{\mathcal{R}_M} \quad (17)$$

$$L_{m1} = N_1 \phi_{m1} / i_1$$

$$(5) \phi_m = \frac{1}{R_m} (N_1 i_1 + N_2 i_2) = \frac{L_{m1}}{N_1^2} (N_1 i_1 + N_2 i_2)$$

reemplazando R_m en (5) se tiene:

$$\dot{\phi}_m = \frac{L_{m1}}{N_1} (i_1 + \frac{N_2}{N_1} i_2) \quad (18)$$

Suponiendo que no existe saturación, la inductancia mutua L_{m1} será constante y se cumplirá instantáneamente que:

$$e_{m1} = N_1 \frac{d\phi_m}{dt} = L_{m1} \frac{d}{dt} (i_1 + \frac{N_2}{N_1} i_2) \quad (19.a)$$

análogamente para:

$$e_{m2} = N_2 \frac{d\phi_m}{dt} = L_{m2} \frac{d}{dt} (i_2 + \frac{N_1}{N_2} i_1) \quad (19.b)$$

Por lo que la fuerza electromotriz e_{m1} es igual a la que se produce en una inductancia L_{m1} por la cual circula una corriente igual a:

$$i_1 + \frac{N_2}{N_1} i_2$$

Tal corriente se denomina "corriente magnetizante" y se designa por i_m .

El transformador entonces ya no establece una ligazón magnética, sino que simplemente una relación de magnitudes (ver Fig. 8).

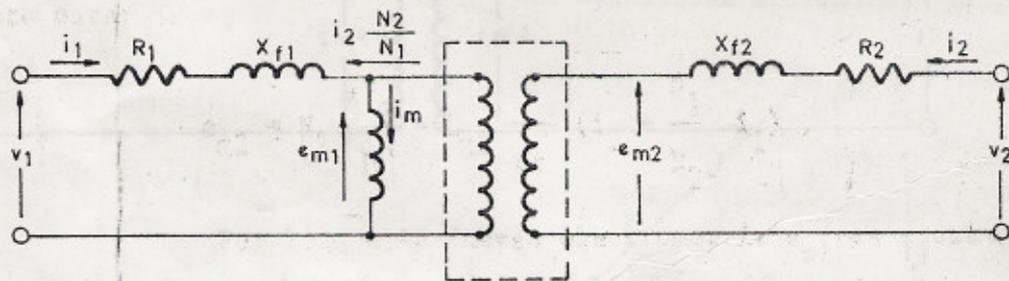


Figura 8. Inclusión de efecto magnético.

La resistencia y la reactancia de fuga del secundario pueden reemplazarse por una impedancia ubicada en el primario que produzca los mismos efectos que aquéllas. Para encontrar esta impedancia, previamente deben establecerse algunas definiciones:

En un transformador ideal, es decir sin resistencias, in-

ductancias de fuga ni reluctancia y con la convención de la Figura 4, se cumple que:

$$\frac{v_1}{v_2} = a \tag{20}$$

y

$$\frac{i_1}{i_2} = \frac{1}{a} \tag{21}$$

donde a es la razón de transformación:

$$a = \frac{N_1}{N_2} \tag{22}$$

Por lo tanto, si se denomina v_{R2} la caída de tensión en la resistencia R_2 al circular la corriente i_2 , su valor en el primario será:

$$v'_{R2} = v_{R2} \frac{N_1}{N_2} = a v_{R2}$$

La resistencia R'_2 que se tendría que colocar en el primario debe provocar la misma caída, al circular la corriente:

$$i_2 \frac{N_2}{N_1} = i'_2 \quad R'_2 i_2 \frac{N_2}{N_1} = v_{R2}$$

Luego:

$$v'_{R2} = a v_{R2} = R'_2 i'_2 = R'_2 (i_2 \cdot \frac{1}{a})$$

o sea:

$$R'_2 = a^2 \frac{v_{R2}}{i_2} = a^2 R_2 \tag{23}$$

Igual razonamiento se sigue para referir al primario la reactancia X_{f2} .

$$X'_{f2} = a^2 X_{f2} \tag{24}$$

Luego se puede dibujar el circuito en la forma indicada en la Fig. 9.

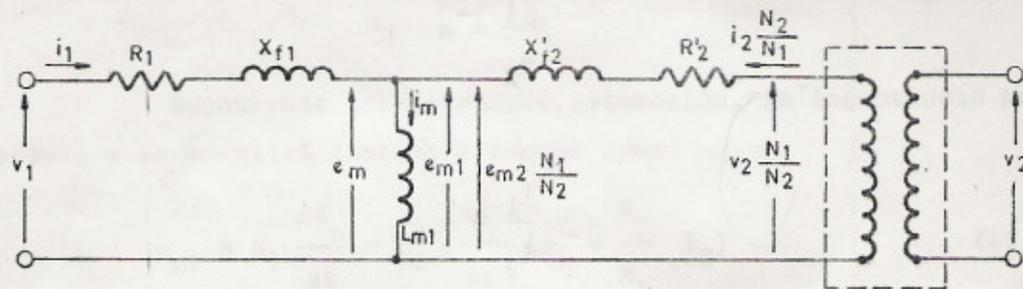


Figura 9. Circuito equivalente parcial referido al lado primario.

También es posible referir al primario una carga colocada en el secundario, con lo cual puede suprimirse el transformador, obteniéndose el circuito equivalente de la Fig. 10.

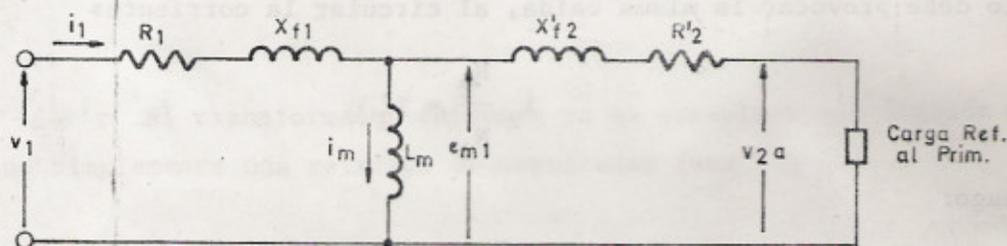


Figura 10. Carga referida al lado primario.

4.6.- Efecto de las pérdidas en el fierro y la saturación.

En el análisis anterior se ha supuesto que el núcleo del transformador no se encuentra saturado ni tiene pérdidas por histéresis y por corrientes de Foucault. A continuación se verá como influyen estos factores.

Considerando un transformador con su secundario abierto y voltaje sinusoidal v_1 aplicado al primario, la caída de tensión en la resistencia y en la reactancia de fuga del primario es muy pequeña; la f.e.m. inducida e_1 es prácticamente igual al voltaje aplicado v_1 y será por consiguiente sinusoidal. Para que e_1 sea sinusoidal, también ha de serlo el flujo cuyo valor instan-

táneo puede representarse por:

$$\phi_m = \phi_{m\acute{a}x} \text{ sen}\omega t$$

la f.e.m. inducida será entonces:

$$e_1 = N_1 \frac{d\phi_m}{dt} = \omega N_1 \phi_{m\acute{a}x} \text{ cos}\omega t \quad (25)$$

El valor efectivo de la f.e.m. es:

$$|E_1| = \frac{2\pi}{\sqrt{2}} f N_1 \phi_{m\acute{a}x} = 4,44 f N_1 \phi_{m\acute{a}x} \quad (26)$$

como $|E_1|$ es prácticamente igual a $|\dot{V}_1|$ puede escribirse:

$$\phi_{m\acute{a}x} \approx \frac{|\dot{V}_1|}{4,44 f N_1} \quad (27)$$

La relación anterior deja de manifiesto que el flujo queda determinado exclusivamente por el voltaje aplicado, su frecuencia y el número de vueltas del enrollado. Las propiedades magnéticas del núcleo determinan la corriente de excitación: Ésta deberá ser tal que produzca la fuerza magnetomotriz necesaria para crear el flujo requerido. Dada la característica magnética no lineal del hierro, la forma de onda de la corriente de excitación será diferente de la forma de onda de flujo. La curva de corriente de excitación en función del tiempo puede determinarse gráficamente a partir de la característica magnética del material del núcleo en la forma ilustrada en la Fig. 11. La figura 11(a) muestra las ondas sinusoidales de e_1 y ϕ_m y la figura 11(b), el ciclo de histéresis correspondiente al núcleo.

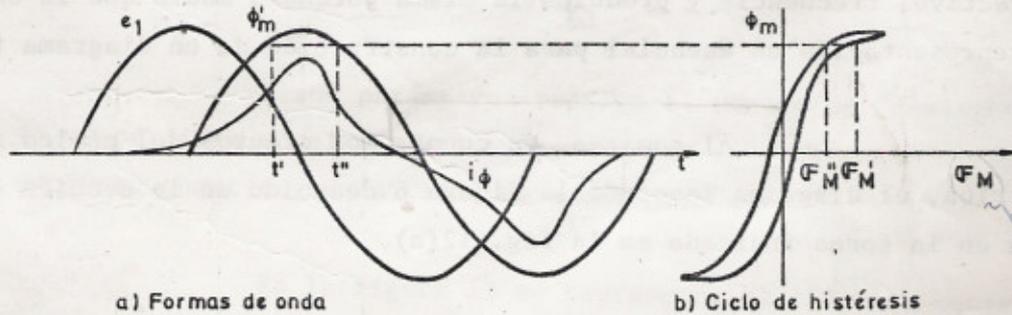


Figura 11. Determinación gráfica de corriente de excitación.

Mediante este ciclo de histéresis es posible determinar la f.m.m. correspondiente a diferentes valores del flujo. Por ejemplo, en el instante t' el valor instantáneo del flujo es ϕ'_m siendo éste creciente; el valor de la f.m.m. es \mathcal{F}' en la parte creciente del flujo en el ciclo de histéresis. En el instante t' se ubica en la figura 11(a) el valor correspondiente i'_ϕ de la corriente de excitación. En el instante t'' el flujo también tiene el valor ϕ'_m pero es decreciente y los valores de f.m.m. y corriente son \mathcal{F}'' e i''_ϕ respectivamente. En esta forma puede dibujarse punto por punto la curva de la corriente de excitación i_ϕ que se indica en la figura 11(a).

La corriente de excitación contiene una fundamental y armónicas impares. La fundamental puede descomponerse en dos componentes, una en fase con e_1 y otra a 90° en atraso. La componente fundamental en fase suministra las pérdidas por histéresis y corriente de Foucault; recibe, por esta razón, el nombre de "componente de pérdidas" de la corriente de excitación. El residuo recibe el nombre de corriente de magnetización: está formada por la componente fundamental a 90° de atraso con respecto a e_1 y todas las armónicas; la armónica más importante es la tercera. En un transformador de poder, la tercera armónica suele ser del orden de un 40% de la corriente de excitación.

Salvo en los problemas directamente relacionados con los efectos de las armónicas, la forma de la onda de corriente de excitación normalmente no necesita ser tomada en cuenta, dado que en sí es pequeña. Por ejemplo, la corriente de excitación de un transformador de poder típico es del orden de 5% de la corriente de plena carga.

En consecuencia los efectos de las armónicas normalmente desaparecen frente a la presencia de las corrientes sinusoidales que circulan a través de los elementos lineales del circuito. La corriente de excitación puede entonces presentarse por una "onda sinusoidal equivalente" que tenga igual valor efectivo, frecuencia y produzca la misma potencia media que la onda real. Esta representación es esencial para la construcción de un diagrama fasor.

Al tomarse en cuenta los efectos del núcleo analizados más arriba, el diagrama fasor de la figura 6 deducido en la sección 4.4, se modifica en la forma indicada en la fig. 12(a).

En el diagrama mencionado, el fasor I_o representa la senoide equivalente de la corriente de excitación. La componente I_p en fase con E_1 representa la corriente de pérdida. La componente I_M en fase con el flujo, una onda sinusoidal equivalente de valor efectivo igual a la corriente de magne

tización. Para mayor claridad la descomposición de I_0 se muestra ampliada en la figura 12(b).

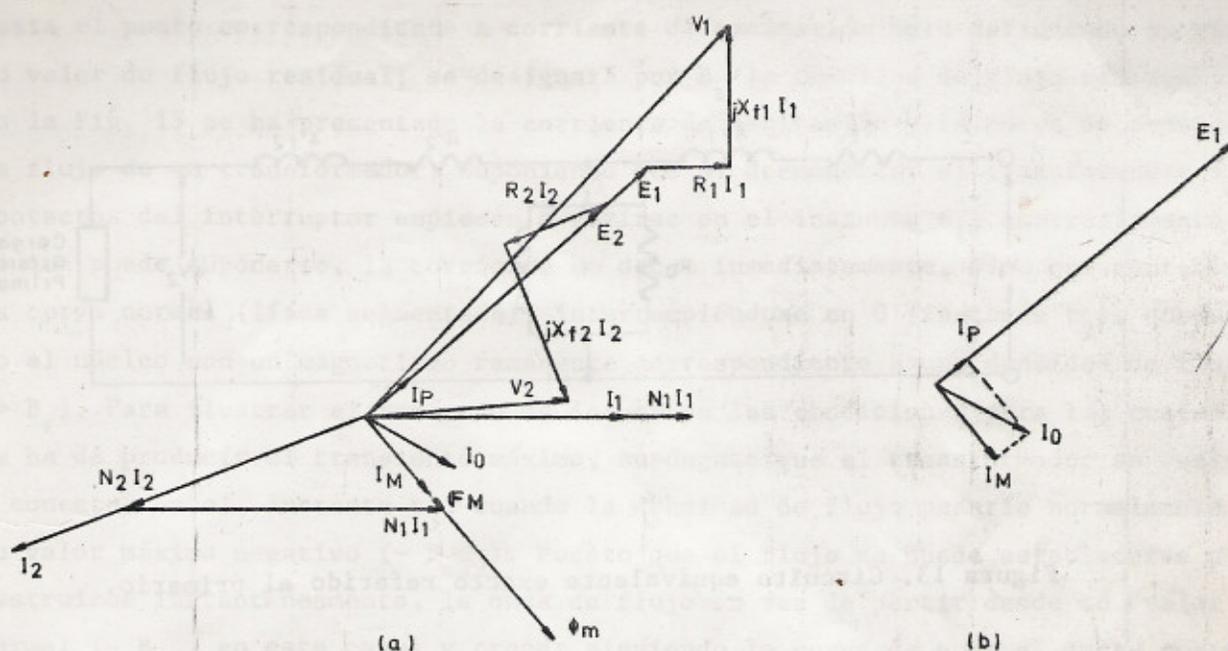


Figura 12. Diagrama fasorial completo.

Es importante notar que la corriente de magnetización no contribuye a la potencia activa, pues su componente fundamental se encuentra en cuadratura con la f.e.m. inducida.

La presencia de la corriente \dot{I}_p obliga a modificar el circuito equivalente de la figura 10 deducido en la sección 4.5. Como esta corriente se encuentra en fase con \dot{E}_1 , circulará por una rama puramente resistiva que debe estar en paralelo con L_{ml} , puesto que la suma fasorial de \dot{I}_p e \dot{I}_m es igual a \dot{I}_0 .

Es costumbre representar la rama resistiva por una resistencia R_0 y la rama inductiva por una reactancia X_0 :

$$X_0 = 2\pi f L_{ml} \quad (28)$$

Estos parámetros reciben el nombre de "resistencia de excitación" (o de pérdidas en el núcleo) y "reactancia de excitación" respectivamente. En conjunto constituyen la "rama de excitación".

En la figura 13 se representa el circuito equivalente resultante después de las modificaciones citadas.

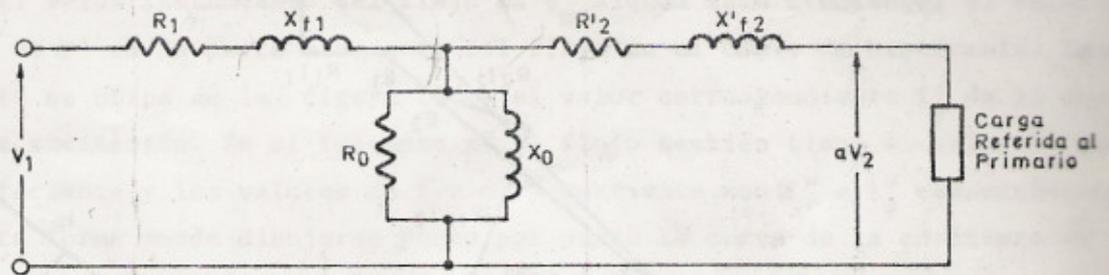


Figura 13. Circuito equivalente exacto referido al primario.

Como la magnitud de la corriente de excitación es pequeña comparada con las corrientes de carga, el error que se cometa al trasladar la rama de excitación del centro del diagrama a la entrada, será despreciable. Se obtiene así el circuito de la Fig. 14, conocido como "circuito equivalente aproximado", para diferenciarlo del de la figura 13, que recibe el nombre de "circuito equivalente exacto".

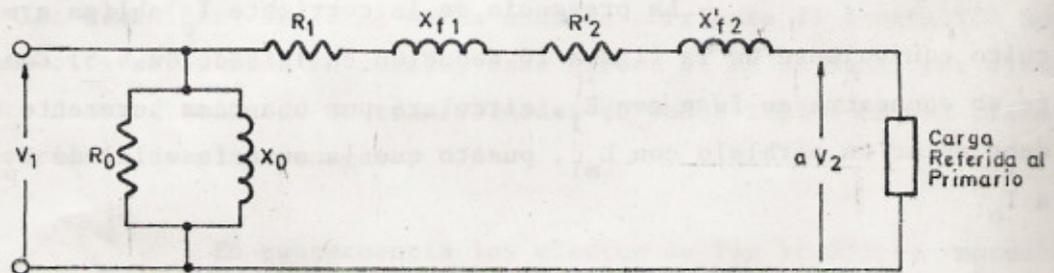


Figura 14. Circuito equivalente aproximado referido al primario.

4.7.- Corriente de conexión.

Cuando se conecta un transformador, la corriente de excitación puede alcanzar durante los primeros instantes, valores muy altos (inrush). Esto puede ocasionar una fuerte disminución momentánea del voltaje si la impedancia de la fuente de excitación es elevada; o bien puede hacer operar las protecciones de sobrecorriente y los relés diferenciales comunes. A continuación se analizará la razón por la cual se presenta el fenómeno.

Al desconectar un transformador, la corriente de excitación será cero, pero no así el flujo. Este último seguirá el ciclo de histéresis hasta el punto correspondiente a corriente de excitación cero definiendo un cierto valor de flujo residual; se designará por B_r la densidad de flujo residual. En la Fig. 15 se ha presentado la corriente de excitación y la curva de densidad de flujo de un transformador. Suponiendo que al desconectar el transformador los contactos del interruptor empiecen a abrirse en el instante t_1 , contrariamente a lo que puede suponerse, la corriente no decae inmediatamente, sino que continúa la curva normal (línea segmentada), interrumpiéndose en 0 (instante t_2), quedando el núcleo con un magnetismo remanente correspondiente a una densidad de flujo ($+B_r$). Para ilustrar el fenómeno de inrush en las condiciones para las cuales se ha de producir el transiente máximo, supóngase que el transformador se vuelve a conectar en el instante t_3 , cuando la densidad de flujo pasaría normalmente a su valor máximo negativo ($-B_{m\acute{a}x}$). Puesto que el flujo no puede establecerse o destruirse instantáneamente, la onda de flujo en vez de partir desde su valor normal ($-B_{m\acute{a}x}$ en este caso) y crecer siguiendo la curva de puntos, parte con el valor residual B_r y sigue la curva continua. La curva será siempre una senoide (desplazada) independientemente del grado de saturación del núcleo, puesto que a un voltaje aplicado sinusoidal debe corresponder una f.e.m. inducida de la misma forma y por tanto un flujo también sinusoidal. La saturación no modifica el flujo, sino solamente la corriente de excitación.

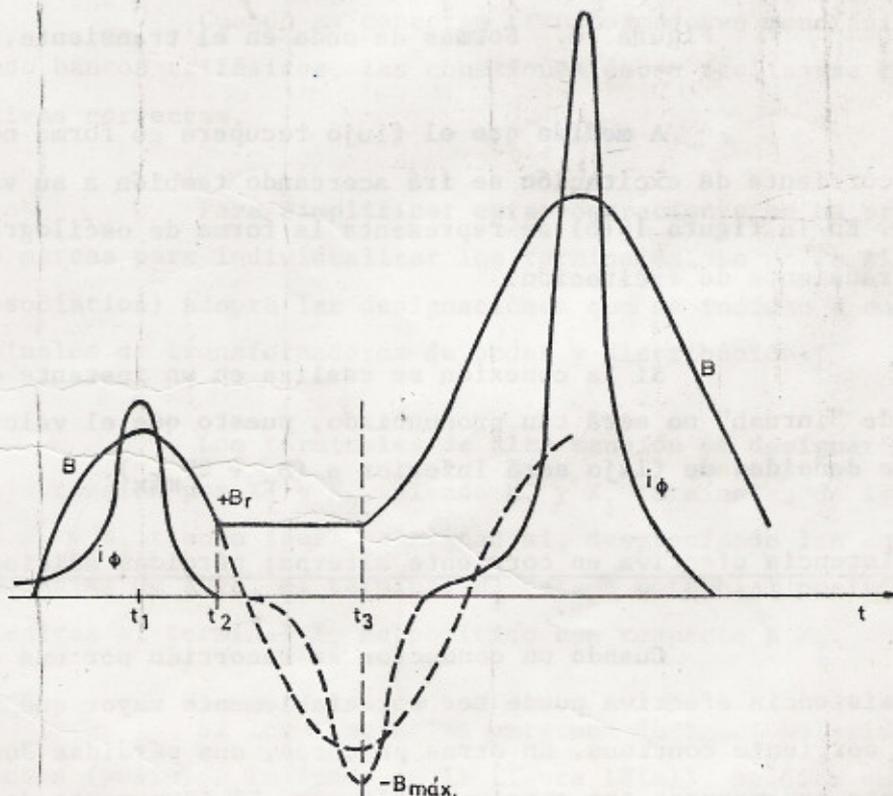


Figura 15. Formas de onda de flujo y corriente a la partida.

La onda de corriente que corresponde a la onda de densidad del flujo será i_ϕ . El valor máximo teórico de la curva B es $(B_r + 2B_{m\acute{a}x})$; si el transformador se ha diseñado para una densidad máxima de flujo que está dentro de los valores normalmente económicos, la cresta de B producirá una sobresaturación del circuito magnético, lo que exigirá una corriente de excitación de valor máximo muy elevado.

El flujo decrecerá rápidamente. En la figura 16(a) se puede observar cómo, después de algunos ciclos, éste vuelve a su valor normal. En esta figura se indica con una línea de puntos el eje de la onda sinusoidal que indica en cuánto ha sido desplazada la senoide de su posición normal por la presencia de un flujo transiente. En otras palabras la línea de puntos representa la componente transiente del flujo.

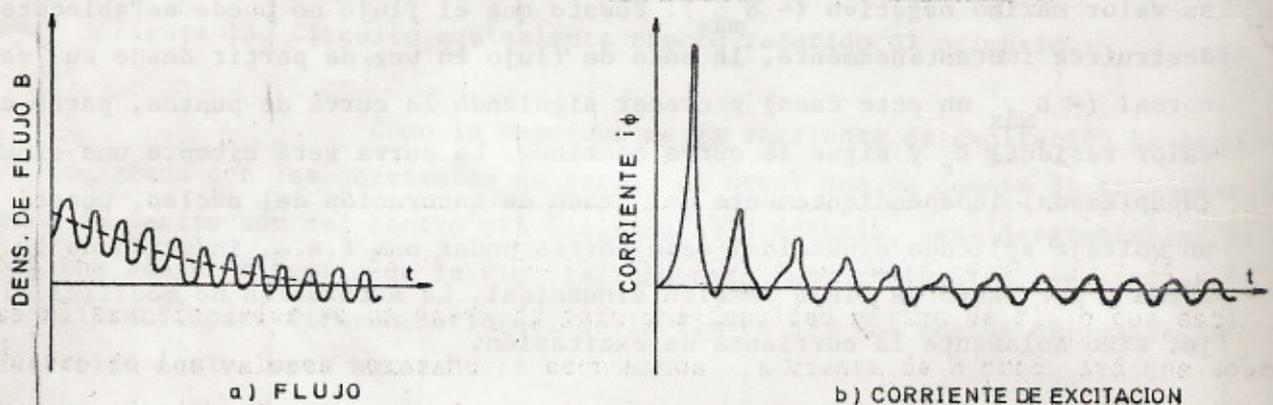


Figura 16. Formas de onda en el transiente.

A medida que el flujo recupera su forma normal de variación, la corriente de excitación se irá acercando también a su valor y a su forma normal. En la figura 16(b) se representa la forma de oscilograma de la corriente transiente de excitación.

Si la conexión se realiza en un instante distinto a t_3 el fenómeno de "inrush" no será tan pronunciado, puesto que el valor de cresta de la onda de densidad de flujo será inferior a $(B_r + 2B_{m\acute{a}x})$.

4.8.- Resistencia efectiva en corriente alterna; pérdidas adicionales.

Cuando un conductor es recorrido por una corriente alterna, su resistencia efectiva puede ser apreciablemente mayor que si fuera recorrido por corriente continua. En otras palabras, sus pérdidas Joule por unidad de corriente son mayores con corriente alterna. El incremento de las pérdidas se debe a la repartición no uniforme de la corriente a través de la sección del conductor magnético, ocasionada por el campo magnético variable producido en el

interior del conductor con su propia corriente y por la corriente de los conductores que lo rodean. Estos efectos reciben respectivamente los nombres de "efecto pelicular" (Skin) y "efecto de proximidad". Las pérdidas adicionales causadas por ellos aumentan con la frecuencia de la corriente y con el tamaño del conductor, y disminuyen usando conductores retorcidos y convenientemente transpuestos.

Por otra parte, cuando la corriente entregada por un transformador aumenta, las pérdidas por histéresis y por corriente de Foucault en el núcleo y en las partes de las estructuras cercanas a los enrollados aumentan, aún cuando el flujo mutuo no varía. Estas pérdidas, comunmente llamadas "pérdidas adicionales" (Stray Load Losses), son ocasionadas por el incremento de los flujos de fuga que se produce al aumentar la carga; dependen esencialmente de las corrientes en los enrollados y varían aproximadamente con el cuadrado de éstas. Por esta razón pueden ser tomadas en cuenta con bastante aproximación, suponiendo la resistencia efectiva en corriente alterna de los enrollados mayor que si solamente existieran los efectos "pelicular" y de "proximidad". En un transformador de poder bien diseñado, las pérdidas son pequeñas y la resistencia efectiva de los enrollados difiere poco de la resistencia en corriente continua (la resistencia en C.A. es del orden de 10% mayor).

4.9.- Polaridad.

Cuando se conectan transformadores monofásicos en paralelo o formando bancos trifásicos, las conexiones deben realizarse con las polaridades relativas correctas.

Para simplificar estas operaciones se ha procedido a normalizar las marcas para individualizar los terminales. La norma ASA (American Standard Association) adoptó las designaciones que se indican a continuación para los terminales de transformadores de poder y distribución:

Los terminales de alta tensión se designarán por H_1 y H_2 y los de baja tensión por X_1 y X_2 , siendo H_1 y X_1 terminales de igual polaridad. Se dice que H_1 y X_1 tienen igual polaridad si, despreciando las caídas internas en las impedancias de fuga, el terminal H_1 está a potencial positivo con respecto a H_2 , mientras el terminal X_1 es positivo con respecto a X_2 .

Si los terminales externos de igual polaridad se encuentran adyacentes (posición indicada en la figura 16(a)), se dice que el transformador tiene "polaridad externa sustractiva". Si el terminal H_1 se encuentra adyacente a X_2 se dirá que el transformador tiene "polaridad externa aditiva" (Fig.

17(b)). La designación de polaridad sustractiva o aditiva se justificará más adelante cuando se estudien los métodos para determinar la polaridad (sección 5.3).

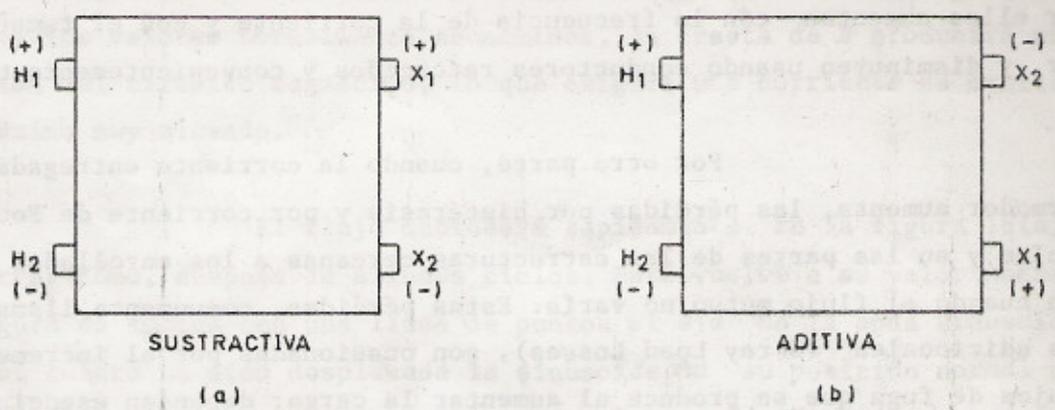


Figura 17. Tipos de polaridad externa.

La polaridad externa será aditiva o sustractiva dependiendo exclusivamente de la forma como se realizan las conexiones de los extremos de los enrollados a los terminales externos del transformador. Las marcas de polaridad externa proporcionan todas las informaciones necesarias para poder conectar transformadores en los circuitos. Sin embargo, cuando se diseñan transformadores interesa además la "polaridad interna" de los enrollados. La polaridad interna queda determinada por el sentido del embobinado y sólo puede alterarse cambiando el sentido de uno de los enrollados. En la figura 18 se ilustran los dos sentidos relativos posibles que dan origen a las polaridades relativas posibles.

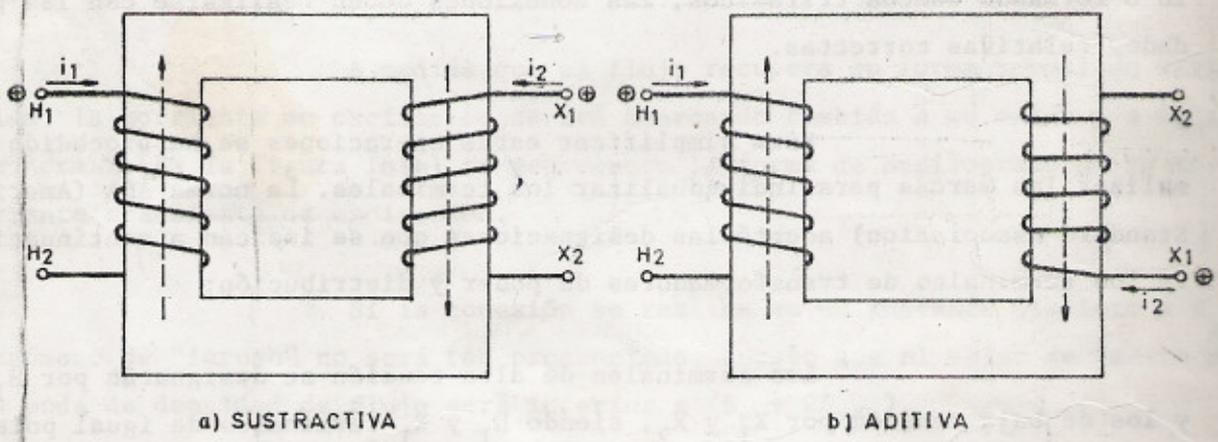


Figura 18. Tipos de polaridad interna.

La polaridad interna puede definirse en base a los enlaces de flujos que producen las corrientes al circular por los enrollados. Se dice que dos terminales son de igual polaridad si al entrar corriente por ellos producen enlaces de flujo del mismo sentido.

4.10.- Regulación de voltaje.

Se define la regulación de un transformador como la variación de voltaje secundario, expresado en tanto por ciento de voltaje secundario a plena carga, que se produce al variar la carga entre los KVA nominales y cero, con determinado factor de potencia y con un voltaje primario constante.

Designando por

V_1 = voltaje primario constante

a = razón de transformación

V_2 = voltaje secundario a plena carga.

$\frac{V_1}{V_2} = a$

$V_1 = a V_2$

La regulación queda expresada como:

$$\text{Reg.}\% = \frac{V_1/a - V_2}{V_2} \times 100 \quad (29)$$

Conviene recalcar que $(V_1/a - V_2)$ es la diferencia algebraica y no fasorial. Con ayuda del diagrama fasorial puede deducirse una expresión aproximada para la regulación en función del factor de potencia, de la resistencia equivalente y de la reactancia de fuga equivalente, como se verá a continuación.

El diagrama fasor de la Figura 12 puede representarse en términos de "valores equivalentes" determinados en la forma indicada en la sección 4.5. En vez de referir los valores secundarios al primario se refieren los primarios al secundario. Si además se gira en 180° la corriente secundaria, se obtendrá el diagrama fasor de la Figura 19. Al girar la corriente en 180°, los amperes-vueltas cumplirán ahora la relación $N_1 I_1 - N_2 I_2 = N_1 I_0$ en lugar de $N_1 I_1 + N_2 I_2 = N_1 I_0$.

En el diagrama de la Figura 19, las magnitudes equivalentes referidas han sido designadas con cremilla (')

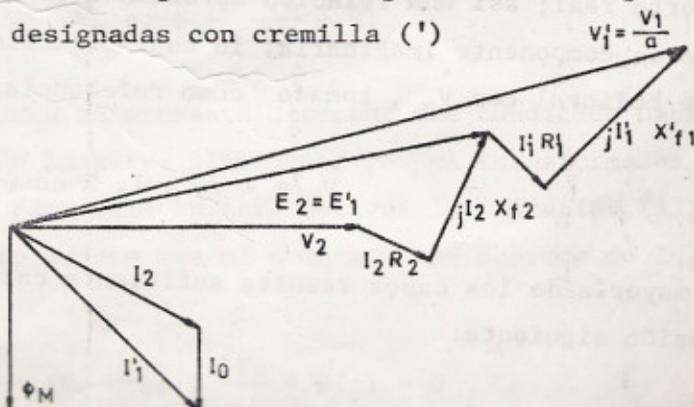


Figura 19. Diagrama fasor referido al secundario.

Se ha dicho que la corriente de excitación de un transformador de poder es pequeña comparada con la corriente nominal (del orden de 5% de la corriente nominal). Por consiguiente, en la mayoría de los problemas ésta puede desprejarse. Al desprejarse la corriente de excitación en el diagrama anterior, la corriente I_1 pasa a confundirse con I_2 . Además, las caídas de tensión en las resistencias R_2 y R_1' pasan a estar en fase y lo mismo ocurre entre las caídas en las reactancias de fuga. Por consiguiente, puede escribirse:

$$R_2 \dot{I}_2 + R_1' \dot{I}_1' = (R_2 + R_1') \dot{I}_2 = R \dot{I}_2 \quad (30)$$

$$X_{f2} \dot{I}_2 + X_{f1}' \dot{I}_1' = (X_{f2} + X_{f1}') \dot{I}_2 = X \dot{I}_2 \quad (31)$$

La resistencia $R = R_2 + R_1'$ representará la resistencia equivalente del transformador referida al secundario y la reactancia $X = X_{f2} + X_{f1}'$ la reactancia equivalente del transformador referida al secundario.

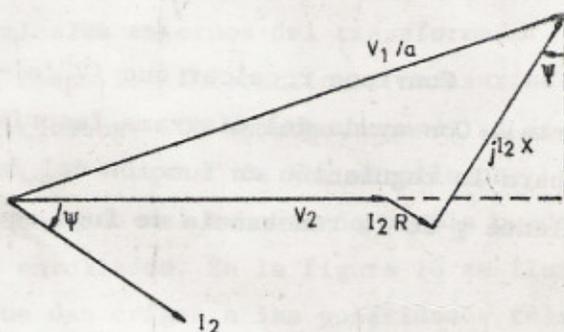


Figura 20. Diagrama equivalente.

Del diagrama de la Figura 20 se desprende que:

$$\dot{V}_1/a = V_2 + I_2 R \cos\psi + I_2 X \operatorname{sen}\psi + j(I_2 X \cos\psi - I_2 R \operatorname{sen}\psi)$$

Normalmente el término imaginario es pequeño comparado con la parte real; así una relación aproximada de la regulación se obtiene desprejando la componente imaginaria, lo cual significa suponer que V_1/a es aproximadamente colineal con V_2 , tomado como referencia. En consecuencia:

$$V_1/a \approx V_2 + I_2 R \cos\psi + I_2 X \operatorname{sen}\psi \quad (32)$$

y en la mayoría de los casos resulta suficiente calcular la regulación mediante la expresión siguiente:

$$\text{Reg. \%} = \frac{I_2 R \cos\psi + I_2 X \sin\psi}{V_2} \cdot 100 \quad (33)$$

Cabe hacer notar que la expresión anterior permite calcular la regulación no solamente para plena carga sino que para cualquier carga.

4.11.- Rendimiento.

Se define el rendimiento η como el cociente entre potencia útil P_u y la potencia total de entrada P_T . El rendimiento se expresa normalmente en por ciento:

$$\eta = \frac{P_u}{P_T} \cdot 100 \quad (34)$$

La potencia total puede expresarse como la suma de la potencia útil más las pérdidas P_p :

$$P_T = P_u + P_p \quad (35)$$

En un transformador, la potencia útil puede expresarse como $V_2 I_2 \cos\psi$. La potencia perdida se compone de las pérdidas en el cobre $R I_2^2$ y de las pérdidas en el hierro P_{Fe} . Las primeras serán esencialmente variables con la carga, mientras que las pérdidas en el hierro serán constantes para un voltaje primario constante.

El rendimiento podrá expresarse entonces como:

$$\eta = \frac{V_2 I_2 \cos\psi}{V_2 I_2 \cos\psi + R I_2^2 + P_{Fe}} \times 100 \quad (36)$$

o bien:

$$\eta = \frac{V_2 \cos\psi}{V_2 \cos\psi + \frac{P_{Fe}}{I_2} + R I_2} \quad (37)$$

Será interesante detectar qué condición debe cumplirse con respecto a la magnitud de la carga alimentada por el transformador para que su rendimiento sea máximo. Para ello bastará derivar la expresión (37) con respecto I_2 e igualar a cero. Pero puesto que el numerador no depende de I_2 , es suficiente:

$$\frac{d}{dI_2} \left(V_2 \cos\psi + \frac{P_{Fe}}{I_2} + R I_2 \right) = 0$$

de donde:

$$RI_2^2 = P_{Fe} \tag{38}$$

La expresión anterior indica que el rendimiento será máxi
mo cuando la pérdida en el fierro y las pérdidas en el cobre se igualan.

5.- ENSAYOS DE TRANSFORMADORES.

El programa común de ensayos de un transformador monofási
co incluye alguna o todas las pruebas siguientes:

- 1° Medida de la resistencia óhmica de los enrollados.
- 2° Medida de la razón de transformación.
- 3° Prueba de polaridad.
- 4° Pruebas de circuito abierto y de cortocircuito.
- 5° Prueba de rendimiento.
- 6° Prueba de regulación.
- 7° Pruebas de calentamiento.
- 8° Pruebas dieléctricas.

Se detallará a continuación cada una de estas pruebas con
exclusión de las pruebas dieléctricas; estas últimas en particular pueden consul
tarse en [1] o en las normas respectivas [2].

5.1.- Medida de la resistencia óhmica de los enrollados.

Es necesario para el cálculo de las pérdidas en el cobre
y de la temperatura de los enrollados (al finalizar las pruebas de temperatura,
ver párrafo 5.7), conocer la resistencia de los enrollados. Estas medidas se
efectúan generalmente por los métodos de caída de tensión o de puente, mediante
corriente continua. Mayor exactitud se obtiene, evidentemente, con el método de
puente. Al medirse la resistencia de un enrollado, es muy importante que se efec
túe simultáneamente una determinación exacta de la temperatura de dicho enrolla
do.

5.2.- Medida de la razón de transformación.

Se emplean por lo general dos métodos para efectuar la
prueba de razón de transformación, dependiendo del tipo de transformador y de
las facilidades existentes. El método más empleado en la práctica consiste en

aplicar una tensión alterna de magnitud conocida en un enrollado y medir la tensión inducida en circuito abierto en el otro enrollado. Las medidas de las tensiones se efectúan en ambos enrollados y la relación entre las lecturas de los instrumentos indicará la razón de transformación.

Más exacto es el método que se sigue en las pruebas de fábrica, consistente en comparar la tensión del transformador con un transformador patrón calibrado, cuya razón sea ajustable en pequeños escalones. En este método, ambos transformadores se conectan en paralelo y se aplica tensión a sus enrollados de alta tensión, mientras los de baja se encuentran conectados a un detector sensible, cuya indicación se lleva a cero ajustando la razón del transformador patrón. En este punto las razones de ambos transformadores son iguales.

5.3.- Prueba de polaridad.

Los métodos más comunmente aplicables para determinar la polaridad de un transformador son tres, a saber:

- a) método de comparación con un transformador patrón.
- b) método con corriente continua.
- c) método con corriente alterna.

a) Método de comparación con un transformador patrón.

Quando se dispone de un transformador patrón de polaridad conocida y de igual razón que el que se encuentra bajo prueba, se conectan en paralelo los enrollados de alta tensión de ambos transformadores en la forma indicada en la figura 21. Análogamente se conecta también los terminales de un lado de los enrollados de baja tensión de ambos transformadores, dejando libre los restantes. En estas condiciones se aplica una tensión de valor reducido a los terminales de los enrollados de alta tensión y se mide la tensión entre los terminales libres del lado de baja tensión. Si el voltmetro indica cero o un valor muy pequeño, la polaridad de ambos transformadores será la misma.

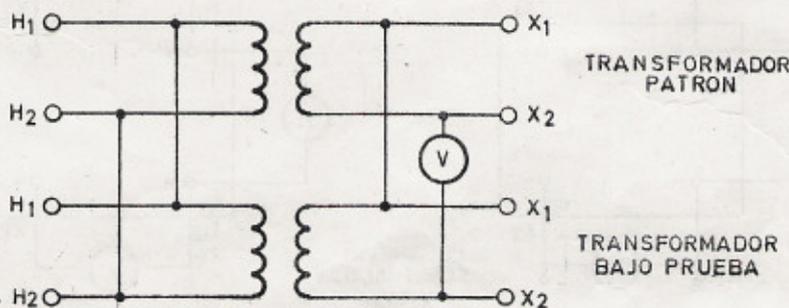


Figura 21. Conexión para prueba de polaridad.

b) Método con corriente continua.

Puede determinarse la polaridad de un transformador mediante una pila y un voltmetro de continua conectados en la forma indicada en la Figura 22. Al conectar la pila en el circuito de alta tensión, se producirá un flujo transiente que inducirá en el enrollado de baja tensión un f.e.m. también transiente.

Si la polaridad del transformador es la indicada en la figura (sustractiva), entonces la f.e.m. inducida en el secundario será tal que X_1 se encuentre a potencial positivo con respecto a X_2 . Conectando el borne positivo del voltmetro a X_1 y el negativo a X_2 , su aguja se deflejará en sentido positivo para luego volver a cero. Cuando se desconecte la pila, se inducirá una f.e.m. en sentido contrario.

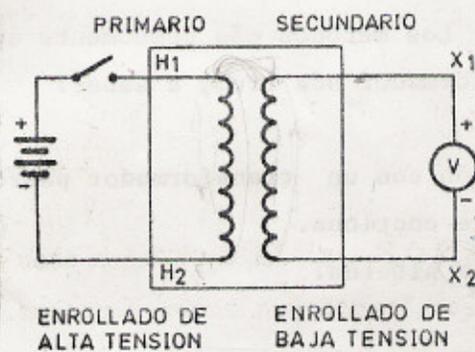


Figura 22. Prueba de polaridad con continua.

c) Método de corriente alterna.

Para esta prueba debe conectarse entre sí el terminal del enrollado de alta tensión con el terminal de baja tensión contiguo (ver Fig. 23). Se aplica una tensión alterna y se miden: la tensión aplicada V_1 y la tensión V entre los terminales libres. Si la tensión V medida entre estos últimos es menor que V_1 , la polaridad es sustractiva; si V es mayor que V_1 , la polaridad es aditiva.

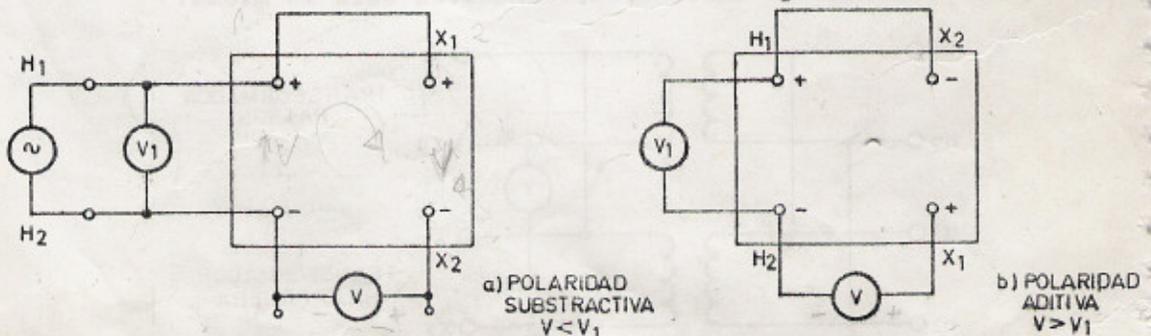


Figura 23. Prueba de polaridad con alterna.

38) Efectivamente, dada la forma cómo han sido unidos entre sí los enrollados, si la polaridad es aditiva, entonces el voltmetro medirá la suma de V_1 y V_2 ($V = V_1 + V_2$).

í máxi
Esta conexión para determinar polaridad justifica el nombre de "aditiva" o "sustractiva" dadas las polaridades externas que puede tener un transformador.

5.4.- Pruebas en circuito abierto y en cortocircuito.

ofási
Las constantes del circuito equivalente y las pérdidas de un transformador pueden determinarse a través de estas dos pruebas:

a) Prueba en circuito abierto.

La prueba denominada en "circuito abierto" permite determinar las constantes de la rama de excitación del circuito equivalente y las pérdidas en el fierro. Esta prueba se realiza en la forma que se indica a continuación.

s con
onsul
Con el lado de alta tensión abierto, se aplica voltaje nominal en el lado de baja tensión. En estas circunstancias circulará por el enrollado de baja tensión la corriente de excitación. Este ensayo debe efectuarse con voltaje sinusoidal, pues la forma de onda afecta el valor de las pérdidas en el fierro. Por esta razón, si es necesario ajustar el valor del voltaje aplicado, esta operación deberá efectuarse mediante un transformador variable. En ningún caso deberá procederse a ajustar el voltaje mediante una resistencia en serie, pues, como se ha visto, la corriente de excitación no es sinusoidal y por consiguiente la caída de tensión que ésta produciría en la resistencia de ajuste no sería sinusoidal; así, aún cuando el voltaje de la fuente fuera sinusoidal, debido a esta caída de tensión el voltaje aplicado al transformador dejaría de serlo.

obre
ura,
se
ante
o de
efec
olla-
En la Figura 24 se muestra el circuito y los instrumentos a utilizar para este ensayo. Se observa la presencia de un voltmetro de valor medio. El objeto de éste es poder comprobar, a través del factor de forma, que la onda es sinusoidal; o bien, poder efectuar las correcciones del caso si no lo es. Es necesario medir la frecuencia pues ésta influye también en las pérdidas en el fierro y en los parámetros de excitación.

la
de
en
La caída de tensión en la impedancia de fuga del primario producida por la corriente de excitación es totalmente despreciable. Por consi-

guiente, el voltaje aplicado V_1 será prácticamente igual a la fuerza electromotriz E_1 inducida por el flujo resultante. Así mismo, las pérdidas en el cobre producidas por esta corriente serán despreciables de manera que la potencia P_1 absorbida será prácticamente igual a las pérdidas en el fierro P_o . Denominando por I_o la corriente de excitación, la impedancia de la rama de excitación Z_o , la resistencia R_o y la reactancia X_o quedarán dadas por:

$$Z_o = \frac{V_1}{I_o}$$

$$R_o = \frac{V_1^2}{P_o}$$

$$Z_o = R_o + jX_o$$

$$Z_o^2 = R_o^2 + X_o^2$$

$$X_o = \sqrt{Z_o^2 - R_o^2}$$

$$Z_o = \frac{V_1}{I_o} \quad (39)$$

$$R_o = \frac{V_1^2}{P_1} \quad (40)$$

$$X_o = \frac{1}{\sqrt{\frac{1}{Z_o^2} - \frac{1}{R_o^2}}} \quad (41)$$

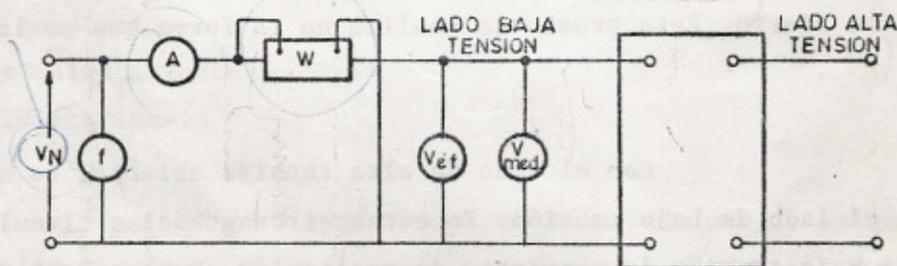


Figura 24. Prueba en circuito abierto.

Los valores obtenidos quedan, evidentemente, referidos al lado de baja tensión.

Si el voltaje aplicado no fuese sinusoidal, debe procederse a corregir las pérdidas en el fierro.

Las pérdidas en el fierro se componen de las pérdidas por histéresis P_H y de las pérdidas por corrientes de Foucault P_F que pueden representarse por la siguiente expresión [4,5]:

$$P_H = K_H f B_m^X \quad \text{Watts/Kg} \quad (42)$$

$$P_F = K_F f^2 B_m^2 \quad \text{Watts/Kg} \quad (43)$$

donde f es la frecuencia, B_m el valor máximo de la densidad de flujo y "x" el "exponente de Steinmetz". Originalmente el valor de este exponente se tomó 1,6 pero con los avances experimentados en el fierro para transformadores, se utilizan actualmente densidades de flujo mayores con lo cual dicho exponente varía hasta 2,5 o más.

En un transformador la densidad de flujo es proporcional a la f.e.m. inducida. Siendo esta última prácticamente igual al voltaje aplicado durante esta prueba, la densidad de flujo puede expresarse en función del voltaje. Las pérdidas en el fierro podrán también presentarse en función del voltaje. Puede demostrarse que las pérdidas por histéresis dependen del valor medio del voltaje mientras que las pérdidas por corrientes de Foucault, del valor efectivo [3]. Estas pérdidas pueden representarse entonces por las siguientes expresiones:

$$P_H = K'_H f \left(\frac{V_{\text{medio}}}{f} \right)^x \quad \text{Watts/Kg} \quad (44)$$

$$P_F = K'_F (V_{\text{ef}})^2 \quad \text{Watts/Kg} \quad (45)$$

Estas fórmulas permiten efectuar las correcciones de las pérdidas por variación de la forma de onda.

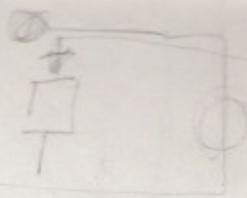
b) Prueba en cortocircuito.

La prueba en cortocircuito consiste en medir voltaje aplicado, corriente y potencia en el lado de alta tensión (primario) de un transformador estando el lado de baja tensión (secundario) cortocircuitado.

Con el lado de baja tensión cortocircuitado, se aplica al lado de alta tensión un voltaje reducido (del orden de 2 a 12% del voltaje nominal) de magnitud tal que circule la corriente nominal.

Designando por V_{cc} el voltaje aplicado, I_N la corriente nominal que circula por los enrollados, P_{cc} la potencia consumida, Z_{cc} la impedancia de cortocircuito, R_{cc} y X_{cc} sus componentes de resistencia y reactancia referida al lado de alta tensión, se tendrá:

$$Z_{cc} = \frac{V_{cc}}{I_N} \quad (46)$$



$$R_{cc} = \frac{P_{cc}}{I_N^2} \quad (47)$$

$$X_{cc} = \sqrt{Z_{cc}^2 - R_{cc}^2} \quad (48)$$

En la Figura 25 se muestra el circuito equivalente con el secundario en cortocircuito. El voltaje inducido en el secundario por el flujo resultante es igual a la caída de tensión en la impedancia de fuga del secundario. Con corriente nominal este voltaje es sólo del orden de 1 a 6% del voltaje nominal. El flujo resultante es por consiguiente muy pequeño; la corriente de excitación y las pérdidas en el fierro serán entonces despreciables. La impedan

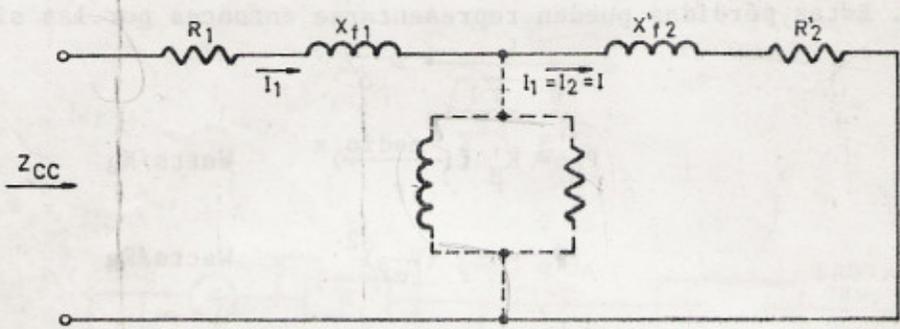


Figura 25. Circuito equivalente con secundario en cortocircuito.

cia de excitación indicada con la línea de punto en la Fig. 25, puede en estas condiciones eliminarse. Las corrientes primaria y secundaria referidas a un mismo lado, serán también aproximadamente iguales. La potencia de entrada será prácticamente igual a las pérdidas totales en el cobre del primario y del secundario. Así mismo el voltaje aplicado será igual a la caída de tensión en la impedancia de fuga equivalente referida al lado de alta tensión, cuyas componentes serán aproximadamente iguales a la resistencia R_{cc} y a la reactancia X_{cc} respectivamente.

La impedancia equivalente puede, desde luego, referirse a uno u otro lado en la forma acostumbrada. Cuando se requiere construir el circuito equivalente exacto, puede calcularse en forma aproximada los valores individuales de las resistencias y reactancias primarias y secundarias suponiendo que:

$$R_1 = R_2 = 0,5 R_{cc} \quad (49)$$

$$X_{f1} = X_{f2} = 0,5 X_{cc} \quad (50)$$

estando todos los valores referidos a un mismo lado.

5.5.- Prueba de rendimiento.

El rendimiento puede determinarse, para una carga dada, a través de la expresión:

$$\eta = \frac{V_2 I_2 \cos \psi}{V_2 I_2 \cos \psi + \text{pérdidas}} \quad (51)$$

En ella los valores V_2 , I_2 y $\cos \psi$ son datos y por lo tanto rigurosamente exactos. Los errores de medidas afectarán solamente a las pérdidas que son pequeñas. El rendimiento podrá, por consiguiente, determinarse con gran exactitud.

Este método es más sencillo y mucho más exacto que el consistente en medir las potencias de entrada y salida.

Las pérdidas se calculan fácilmente. Las pérdidas en el fierro dependen de la densidad de flujo, para forma de onda y frecuencia constante. Si la tensión es constante, la inducción también lo es; por tanto, las pérdidas en el fierro son constantes en vacío y en carga y puede decirse, sin gran error, que corresponden a la potencia consumida en vacío.

Las pérdidas en el cobre del primario y secundario corresponden a la potencia consumida durante una prueba en cortocircuito en la cual el secundario es recorrido por la corriente I_2 . Se ha visto que éstas incluyen las pérdidas suplementarias o parásitas. La componente RI^2 de las pérdidas aumenta con la temperatura mientras las pérdidas parásitas disminuyen con ésta. Por tanto, cuando se desea convertir las pérdidas de una temperatura a otra las dos componentes mencionadas deberán ser convertidas separadamente. De esta manera se tiene:

$$\frac{\text{Pérdidas } R I^2 \text{ a la temperatura } T}{\text{Pérdidas } R I^2 \text{ a la temperatura } t} = \frac{234,5 + T}{234,5 + t} \quad (52)$$

y también:

$$\frac{\text{Pérdidas suplementarias a la temperatura } T}{\text{Pérdidas suplementarias a la temperatura } t} = \frac{234,5 + t}{234,5 + T} \quad (53)$$

El número 234,5 corresponde al valor recíproco del coeficiente de temperatura

del cobre.

Ambas componentes de pérdidas pueden separarse restando de las pérdidas obtenidas durante la correspondiente prueba en cortocircuito, las pérdidas $R I^2$, calculadas en base a las medidas de resistencia óhmica (corregido para la temperatura a la cual se efectuó la prueba en cortocircuito).

Observación. Si el transformador tiene dispositivo auxiliar (ventilador o bomba) hay que añadir a las pérdidas anteriores la potencia consumida por estos equipos.

5.6.- Prueba de regulación.

La regulación puede determinarse cargando el transformador en las condiciones requeridas y midiendo la variación de la tensión secundaria. Sin embargo, este método se emplea raramente debido a que, por lo general, es irrealizable. En la mayoría de los casos la regulación se calcula mediante la fórmula (33).

5.7.- Pruebas de calentamiento.

Las pruebas para determinar las elevaciones de temperatura en condiciones de carga nominales en transformadores pequeños, por lo común se efectúan cargándolo directamente con resistencia óhmica. Cuando los transformadores son demasiado grandes para permitir el uso de este método, se emplean los métodos de oposición o de recuperación, y de cortocircuito.

a) Método de oposición o de recuperación.

Consiste en conectar dos transformadores gemelos con sus enrollados primario y secundario respectivamente en paralelo, en la forma indicada en la Fig. 26 y aplicar a uno de ellos la tensión nominal a frecuencia nominal. Mediante el transformador adicional intercalado entre dos enrollados en paralelo de los transformadores gemelos, se consigue hacer circular por éstos la corriente nominal de frecuencia nominal. De esta manera mediante la tensión nominal aplicada a los transformadores en paralelo, se logra suministrar la potencia correspondiente a las pérdidas en el fierro y mediante el transformador adicional, las pérdidas en el cobre. Este método no requiere, por consiguiente, disponer de mucha potencia para suministrar la potencia total de pérdidas.

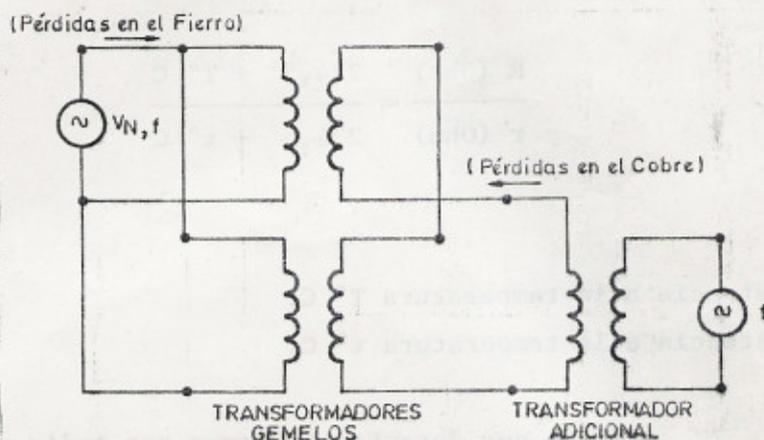


Figura 26. Prueba de calentamiento por método de oposición.

b) Método de cortocircuito.

Este método consiste en determinar en primer lugar el aumento de temperatura normal del aceite en condiciones de plena carga, y luego el aumento equivalente normal del cobre de los enrollados sobre la temperatura máxima del aceite. La elevación de temperatura equivalente del aceite se determina haciendo funcionar el transformador en cortocircuito, hasta la estabilización térmica, con una corriente en los enrollados de tal valor que las pérdidas en el cobre durante este ensayo sean iguales a la suma de las pérdidas normales del hierro y pérdidas a plena carga en el cobre. El aumento de temperatura en el cobre de los enrollados sobre la temperatura máxima del aceite se determina haciendo funcionar el transformador en cortocircuito, pero con corriente reducida a la normal hasta que se llega a la estabilidad de temperatura. La temperatura del cobre podrá a continuación determinarse por mediciones de resistencia. La elevación de temperatura del cobre sobre la temperatura del aceite se obtendrá entonces por simple diferencia. El aumento de temperatura de los enrollados en condiciones de plena carga es igual a la suma del aumento máximo de temperatura del aceite determinado durante el primer ensayo, y de la elevación de temperatura del cobre determinado durante la segunda prueba.

Las medidas de temperatura del aceite se efectúan por medio de termopares o termómetros sumergidos en el aceite por encima del núcleo. Las medidas de temperatura de los enrollados se determinan por comparación entre

las medidas de resistencia en caliente hechas al finalizar la prueba y la resistencia en frío medida al iniciarse el ensayo. La relación de temperatura entre las resistencias en frío y en caliente está expresada por la fórmula siguiente:

$$\frac{R \text{ (Ohm)}}{r \text{ (Ohm)}} = \frac{234,5^\circ + T^\circ \text{ C}}{234,5^\circ + t^\circ \text{ C}} \quad (54)$$

donde:

R = resistencia a la temperatura T° C.

r = resistencia a la temperatura t° C.

Dado que durante el tiempo que media entre el instante en que se corta la alimentación al transformador y el instante en que se miden las resistencias en caliente se produce un descenso de temperatura, para poder obtener los valores correctos de resistencia en el momento del corte hay que efectuar correcciones de los valores medidos. Para un enrollado dado; la corrección podrá determinarse con aproximación suficiente dibujando la curva "tiempo-temperatura" mediante los valores de la resistencia medidos después de la desconexión y extrapoliándola gráficamente hasta el valor correspondiente al instante cero.

5.- BIBLIOGRAFIA.

- [1] R. Bean, N. Chackan, H. Moore and E. Wentz: "Transformers for the Electric Power Industry", Mc Graw Hill, 1959.
- [2] ASA Standard C57: "American Standard Requirements, Terminology and Test Code for Distribution, Power and Regulating Transformers and Reactors other than Current-limiting Reactors"
- [3] G. Mueller: "Alternating Current Machines", Mc Graw Hill, 1959.
- [4] A. Langsdorf: "Teoría de las máquinas de corriente alterna", Mc Graw Hill, 1971.
- [5] Massachusetts Institute of Technology: "Magnetic Circuits and Transformers", M.I.T. Press, 1965.

Comité editor:

Nelson Morales O.

Jorge Romo L. (Encargado de Publicaciones)

Agosto, 1982

/mvm.

TRANSFORMADORES DE VARIOS ENROLLADOS

CONTENIDO

1. INTRODUCCION
2. TEORIA DEL TRANSFORMADOR DE TRES ENROLLADOS
3. REPRESENTACION MEDIANTE CIRCUITOS EQUIVALENTES
4. PARAMETROS DEL CIRCUITO EQUIVALENTE (CONEXION ESTRELLA)
 - 4.1. Determinación de los parámetros del circuito equivalente
 - 4.2. Ejemplo
 - 4.3. Circuito equivalente que toma en cuenta la corriente de excitación
5. REGULACION DE TRANSFORMADORES DE TRES ENROLLADOS
6. BALANCE DE POTENCIAS ACTIVAS Y REACTIVAS
7. TRANSFORMADORES DE CUATRO ENROLLADOS
 - 7.1. Circuito equivalente
 - 7.2. Determinación de los parámetros del circuito equivalente
8. OPERACION EN PARALELO
 - 8.1. Operación en paralelo de dos transformadores de tres enrollados
 - 8.2. Operación en paralelo de un transformador de tres enrollados con uno de dos enrollados
9. BIBLIOGRAFIA

TRANSFORMADORES DE VARIOS ENROLLADOS

1. INTRODUCCION

Cuando se usa un transformador de dos enrollados (primario y secundario), se tiene el claro propósito de interconectar dos circuitos de diferentes niveles de tensión manteniendo eléctricamente aislado un circuito con respecto al otro. Sin embargo, a veces es necesario disponer de un mayor número de niveles de tensión para circuitos aislados eléctricamente, en cuyo caso son necesarios transformadores de más de dos enrollados. La aplicación de los transformadores de varios enrollados se encuentra tanto en electrónica como en potencia, para interconectar tres o más sistemas usualmente de diferentes niveles de tensión. También se utilizan en aplicaciones de potencia cuando se forman bancos trifásicos con un tercer enrollado conectado endelta (formando el llamado terciario), que suministra corrientes necesarias para mantener ciertas condiciones eléctricas en el sistema.

Esta publicación trata del análisis de transformadores de varios enrollados, mediante el empleo de circuitos equivalentes.

2. TEORIA DEL TRANSFORMADOR DE TRES ENROLLADOS

Considérese primeramente el caso del transformador de tres enrollados, formado por un núcleo magnético en el cual se han montado tres bobinas. Se puede elegir cualquiera de ellas como primario y las restantes como secundario.

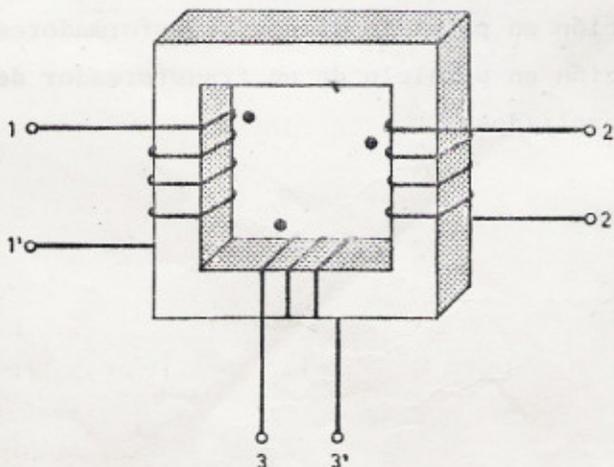


Fig. 1: Transformador de tres enrollados

En la Fig. 1, sean 1-1' los terminales del primario, y 2-2', 3-3' los de los secundarios.

Sean además: R_1, R_2, R_3 : resistencias internas de los enrollados respectivos.

L_1, L_2, L_3 : inductancias propias de los mismos.

$M_{12} = M_{21}, M_{23} = M_{32}, M_{31} = M_{13}$: inductancias mutuas entre enrollados.

$Z_{2L} = R_{2L} + j\omega L_{2L}$: impedancia de la carga conectada al enrollado 2.

$Z_{3L} = R_{3L} + j\omega L_{3L}$: impedancia de la carga conectada al enrollado 3
(ver Fig. 2).

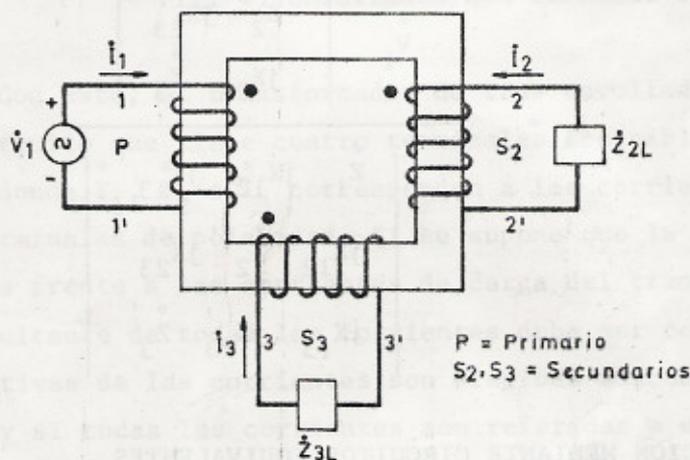


Fig. 2: Transformador de tres enrollados con carga.

Las ecuaciones de funcionamiento del sistema son:

$$v_1 = R_1 i_1 + L_1 \frac{di_1}{dt} + M_{12} \frac{di_2}{dt} + M_{13} \frac{di_3}{dt} \quad (1)$$

$$0 = (R_2 + R_{2L}) i_2 + (L_2 + L_{2L}) \frac{di_2}{dt} + M_{21} \frac{di_1}{dt} + M_{23} \frac{di_3}{dt} \quad (2)$$

$$0 = (R_3 + R_{3L}) i_3 + (L_3 + L_{3L}) \frac{di_3}{dt} + M_{31} \frac{di_1}{dt} + M_{32} \frac{di_2}{dt} \quad (3)$$

Si las variables eléctricas (v, i) varían sinusoidalmente en el tiempo con frecuencia ω constante, en estado permanente se definirán las reactancias $\omega M_{kj} = X_{kj}, \omega L_k = X_k$. Además, se definirán las impedancias de cada circuito:

$$Z_1 = R_1 + jX_1 \quad (4)$$

$$Z_2 = R_2 + jX_2 + Z_{2L} \quad (5)$$

$$\overset{\circ}{Z}_3 = R_3 + jX_3 + \overset{\circ}{Z}_{3L} \quad (6)$$

de modo que las ecuaciones (1), (2) y (3) se puedan escribir fasorialmente como:

$$\overset{\circ}{V}_1 = \overset{\circ}{Z}_1 \overset{\circ}{I}_1 + jX_{12} \overset{\circ}{I}_2 + jX_{13} \overset{\circ}{I}_3 \quad (7)$$

$$0 = jX_{12} \overset{\circ}{I}_1 + \overset{\circ}{Z}_2 \overset{\circ}{I}_2 + jX_{23} \overset{\circ}{I}_3 \quad (8)$$

$$0 = jX_{13} \overset{\circ}{I}_1 + jX_{23} \overset{\circ}{I}_2 + \overset{\circ}{Z}_3 \overset{\circ}{I}_3 \quad (9)$$

de donde se pueden calcular las corrientes $\overset{\circ}{I}_1, \overset{\circ}{I}_2, \overset{\circ}{I}_3$. Por ejemplo:

$$\overset{\circ}{I}_1 = \frac{\overset{\circ}{V}_1 \begin{vmatrix} \overset{\circ}{Z}_2 & jX_{23} \\ jX_{23} & \overset{\circ}{Z}_3 \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} \overset{\circ}{Z}_1 & jX_{12} & jX_{13} \\ jX_{12} & \overset{\circ}{Z}_2 & jX_{23} \\ jX_{13} & jX_{23} & \overset{\circ}{Z}_3 \end{vmatrix}}$$

3. REPRESENTACION MEDIANTE CIRCUITOS EQUIVALENTES

El transformador de tres enrollados se representará esquemáticamente como se indica en la Fig. 3.

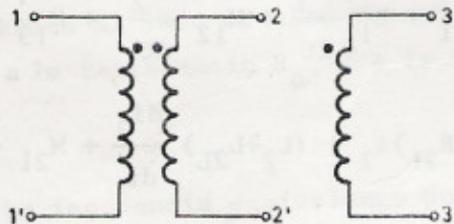


Fig. 3: Representación esquemática de transformador de tres enrollados

En el análisis que sigue, se supone que para las frecuencias normales de los circuitos de potencia (50 c/s) las corrientes absorbidas por las capacitancias de los enrollados son despreciables, con lo cual el circuito queda inalterable si los terminales 1', 2', 3' se consideran conectados formando un terminal común 0, tal como se indica en la Fig. 4. Los circuitos externos irán conec

tados entre los terminales libres 1, 2, 3 y el terminal común 0.

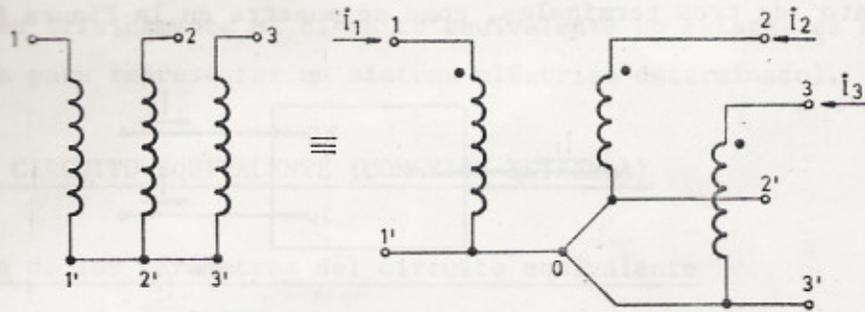


Fig. 4: Enrollados con terminal común

Con esto, el transformador de tres enrollados es equivalente a un elemento de circuito que tiene cuatro terminales accesibles o puertas de entrada (ver Fig. 5), donde $\overset{\circ}{I}_1$, $\overset{\circ}{I}_2$ e $\overset{\circ}{I}_3$ corresponden a las corrientes externas entrando en los tres terminales de polaridad. Si se supone que la corriente de excitación es despreciable frente a las corrientes de carga del transformador, la fuerza magnética resultante de todas las corrientes debe ser cero. Con esto, si las direcciones positivas de las corrientes son elegidas adecuadamente (las indicadas en la Fig. 4) y si todas las corrientes son referidas a una misma base, la suma vectorial de ellas es cero:

$$\overset{\circ}{I}_1 + \overset{\circ}{I}_2 + \overset{\circ}{I}_3 = 0 \tag{11}$$

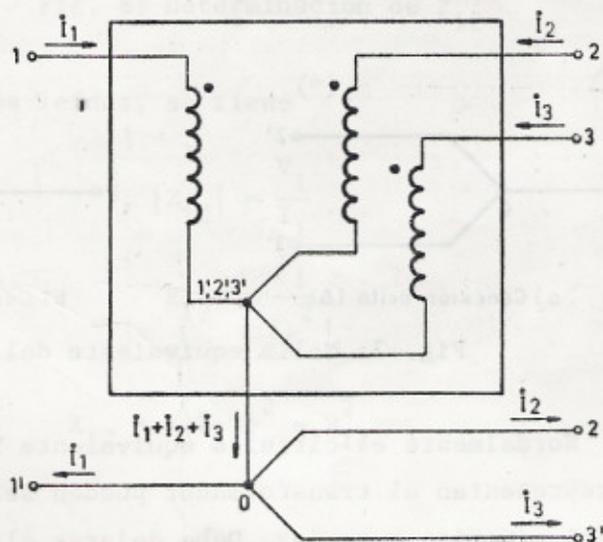


Fig. 5: Circulación de corrientes

Bajo esta suposición, no hay circulación de corriente entre el terminal común 1' 2' 3' y el punto de unión 0 de los circuitos externos, con lo cual,

cuando todas las corrientes están referidas a una misma base, el terminal 1' 2' 3' puede ser omitido y el transformador de tres enrollados es equivalente a un elemento de tres terminales, como se muestra en la Figura 6.

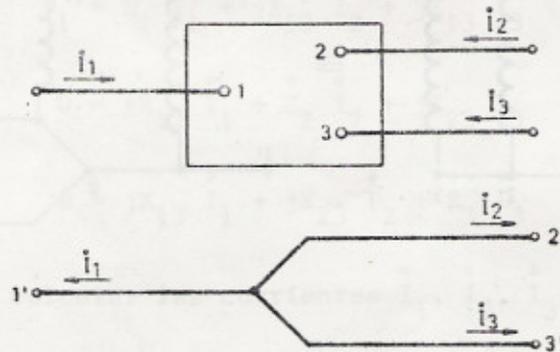


Fig. 6: Representación como elemento de tres terminales.

Si no se considera el fenómeno de excitación magnética del hierro, el transformador se comporta esencialmente como un elemento de circuito lineal, por lo cual la malla encerrada en la caja negra de la Fig. 6 es una malla de impedancias lineal. Esa malla equivalente puede estar en conexión delta o estrella (Figura 7a y 7b respectivamente).

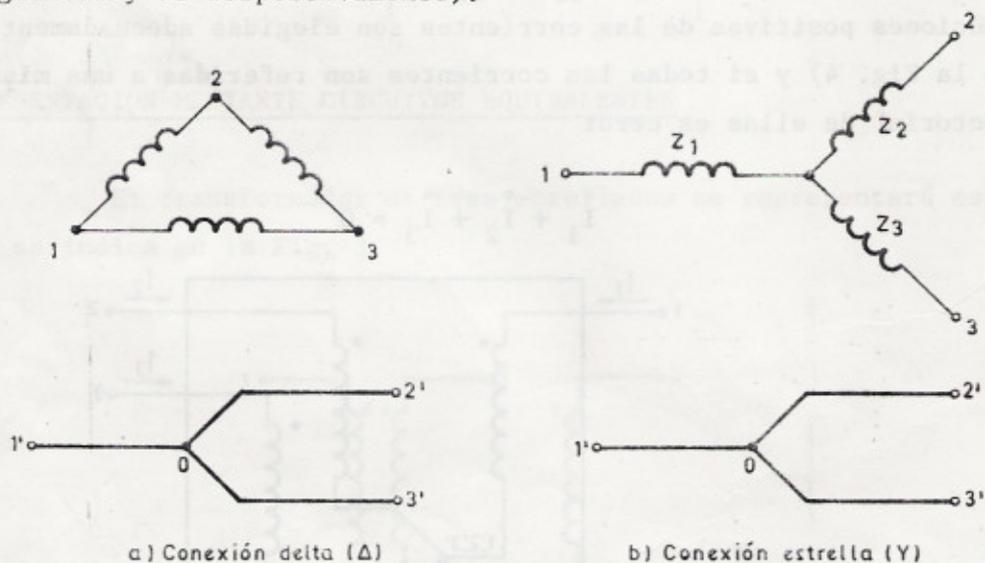


Fig. 7: Malla equivalente del transformador.

Normalmente el circuito equivalente Y es más útil ya que las impedancias que representan al transformador pueden ser conectadas en serie con las impedancias del circuito exterior. Debe dejarse claramente establecido que el circuito equivalente (ya sea en conexión delta o estrella) representa las relaciones entre voltajes y corrientes en los tres enrollados de una sola fase del transformador. Ellos no representan la conexión delta o estrella de los circuitos trifásicos. Además no debe olvidarse que son circuitos equivalentes, y que sólo tie-

men validez para el estudio del comportamiento exterior del transformador; por ello no es raro encontrar como elementos de la estrella equivalente de un transformador de tres enrollados a resistencias negativas o condensadores que en la realidad no existen (físicamente el circuito equivalente no existe, es sólo una ficción matemática para representar un sistema eléctrico determinado).

4. PARAMETROS DEL CIRCUITO EQUIVALENTE (CONEXION ESTRELLA)

4.1. Determinación de los parámetros del circuito equivalente

Supóngase que se aplica un voltaje reducido sin sobrepasar la corriente nominal al enrollado 1, con el enrollado 2 cortocircuitado y el enrollado 3 en circuito abierto; enseguida se leen voltaje (V_1), corriente (I_1) y potencia activa (P_1) de entrada al sistema.

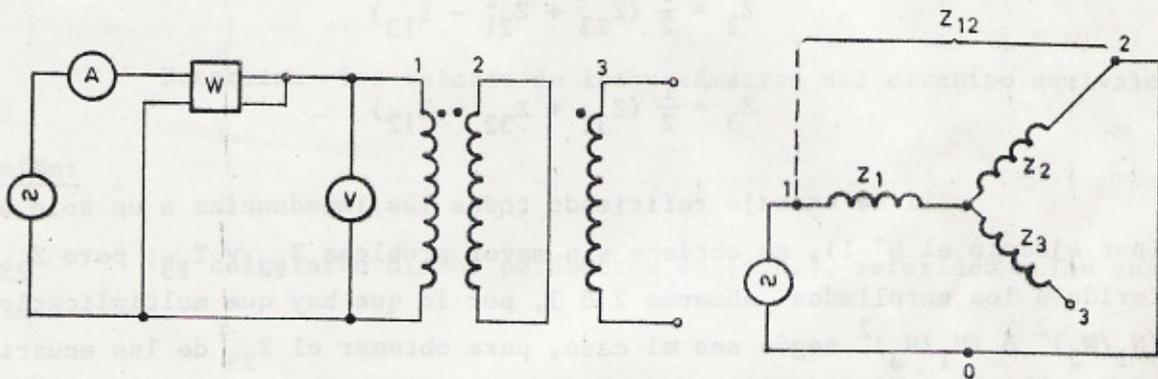


Fig. 8: Determinación de Z_{12}

De los valores leídos, se tiene^(*):

$$|Z_{12}| = \frac{V_1}{I_1} \quad (12)$$

$$R_{12} = \frac{P_1}{I_1^2} \quad (13)$$

$$X_{12} = \sqrt{|Z_{12}|^2 - R_{12}^2} \quad (14)$$

(*) NOTA: A pesar de su notación similar, no debe confundirse a Z_{12} como una impedancia mutua; en realidad corresponde a la impedancia equivalente de paso (serie) entre los terminales 1 y 2. La observación es válida además para Z_{13} y Z_{23} .

Si se refieren todos los valores a una base común, se obtendrán los mismos resultados si se aplica un voltaje reducido al enrollado 2 y se corta el enrollado 1. Esto es, $Z_{21} = Z_{12}$.

Procediendo similarmente con los otros enrollados, según la Figura 8, se tiene:

$$\begin{aligned} Z_{12} &= Z_1 + Z_2 \\ Z_{23} &= Z_2 + Z_3 \\ Z_{31} &= Z_3 + Z_1 \end{aligned} \tag{15}$$

De estas ecuaciones puede obtenerse:

$$\begin{aligned} Z_1 &= \frac{1}{2} (Z_{12} + Z_{13} - Z_{23}) \\ Z_2 &= \frac{1}{2} (Z_{23} + Z_{21} - Z_{13}) \\ Z_3 &= \frac{1}{2} (Z_{31} + Z_{32} - Z_{12}) \end{aligned} \tag{16}$$

Si se trabaja refiriendo todas las impedancias a un solo enrollado (por ejemplo el N° 1), se obtiene sin mayor problema Z_{12} y Z_{13} ; pero Z_{23} está referido a los enrollados números 2 ó 3, por lo que hay que multiplicarlo por $(N_1/N_2)^2$ ó $(N_1/N_3)^2$ según sea el caso, para obtener el Z_{23} de las ecuaciones.

Tal como se obtienen Z_{12} , Z_{23} y Z_{31} , se ve que como corresponde cada una de ellas a una impedancia serie de un transformador de dos enrollados, tendrán reactancia y resistencia positivas. No así el caso de Z_1 , Z_2 ó Z_3 que pueden tener valores de la resistencia y/o reactancia positiva o negativa. Lo anterior no constituye una contradicción ya que el circuito equivalente se comporta como tal sólo para condiciones externas. De este modo, del circuito equivalente se pueden obtener las pérdidas totales que serán siempre positivas. Las pérdidas que se deducen de cada rama del circuito equivalente no representan las pérdidas que corresponden al enrollado respectivo.

4.2. Ejemplo

Sea un transformador monofásico de tres enrollados con las siguientes características:

	<u>Tensión Nominal</u>	<u>Potencia Nominal</u>
Enrollado 1	12.000 V	200 KVA
Enrollado 2	380 V	100 KVA
Enrollado 3	110 V	100 KVA

El transformador ha sido sometido a las siguientes pruebas, con los resultados que se indican:

Cortocircuito en 2, 3 abierto	$V_1 = 492 \text{ V}$	$I_1 = 16,60 \text{ A}$	$P_1 = 2.500 \text{ W}$
Cortocircuito en 3, 2 abierto	$V_1 = 424 \text{ V}$	$I_1 = 16,60 \text{ A}$	$P_1 = 2.000 \text{ W}$
Cortocircuito en 3, 1 abierto	$V_2 = 40 \text{ V}$	$I_2 = 263,16 \text{ A}$	$P_2 = 3.000 \text{ W}$

Determine los valores de los parámetros del circuito equivalente.

Solución:

Se calcularán dichos parámetros en [p.u.], referidos a las bases del lado 1.

A.- VALORES BASES

	1	2	3
V_{base}	12.000 V	380 v	110 V
S_{base}	200 KVA	200 KVA	200 KVA
I_{base}	16,67 A	526,32 A	1.818,18 A
Z_{base}	720 Ω	0,722 Ω	0,061 Ω

Handwritten notes:
 $Z = \frac{V}{I}$
 $I = \frac{S}{V}$
 $Z = \frac{V^2}{S}$

B.- IMPEDANCIAS COMBINADAS EN OHMS, REFERIDAS AL LADO DONDE SE MIDIO

De las relaciones (12), (13) y (14):

$$Z_{12} = \frac{P_{12}}{I_{12}^2} + j \sqrt{\left(\frac{V_{12}}{I_{12}}\right)^2 - \left(\frac{P_{12}}{I_{12}^2}\right)^2}$$

Sustituyendo valores se obtiene:

$$Z_{12} = 9,07 + j 28,22 \quad [\Omega] \text{ en el lado 1}$$

$$Z_{13} = 7,26 + j 24,49 \quad [\Omega] \text{ en el lado 1}$$

$$Z_{23} = 0,0433 + j 0,1457 \quad [\Omega] \text{ en el lado 2}$$

C.- IMPEDANCIAS EN [p.u.]

$$Z[\text{p.u.}] = \frac{Z[\Omega]}{Z_{\text{base}} \text{ del lado correspondiente}}$$

$$Z_{12} = 0,0126 + j 0,0392 \text{ [p.u.]}$$

$$Z_{13} = 0,0101 + j 0,0340 \text{ [p.u.]}$$

$$Z_{23} = 0,0600 + j 0,2018 \text{ [p.u.]}$$

D.- IMPEDANCIAS DEL CIRCUITO EQUIVALENTE EN $[\Omega]$

$$Z_1 = \frac{1}{4} (Z_{12} + Z_{13} - \left(\frac{N_1}{N_2}\right)^2 Z_{23})$$

- NOTAS: 1) Z_{12} y Z_{13} están referidas al lado 1
 Z_{23} está referida al lado 2
 $\left(\frac{N_1}{N_2}\right)^2 Z_{23}$ está referida al lado 1

2) Z_2 y Z_3 se calculan similarmente.

De los valores dados en la sección B de este ejemplo se obtiene:

$$Z_1 = - 26,95 - j 92,59 \quad [\Omega] \text{ en el lado 1}$$

$$Z_2 = 44,99 + j149,03 \quad [\Omega] \text{ en el lado 1}$$

$$Z_3 = 41,37 + j141,57 \quad [\Omega] \text{ en el lado 1}$$

E.- IMPEDANCIAS DEL CIRCUITO EQUIVALENTE EN [p.u.]

Los valores de Z_1 , Z_2 y Z_3 en p.u. se pueden calcular de:

a) las impedancias Z_{12} , Z_{13} , Z_{23} en [p.u.] calculadas en C., según las ecuaciones (16); o bien

b) a partir de los valores en $[\Omega]$ calculados en la sección D, del siguiente modo

$$Z_j[\Omega]/Z_{\text{base del lado } j}$$

los resultados que se obtienen (se propone realizar el cálculo por ambos métodos, como verificación) son:

$$Z_1 = -0,0373 - j 0,1286 \text{ [p.u.]}$$

$$Z_2 = 0,0625 + j 0,2070 \text{ [p.u.]}$$

$$Z_3 = 0,0575 + j 0,1966 \text{ [p.u.]}$$

4.3. Circuito equivalente que toma en cuenta la corriente de excitación

Una forma simple de tomar en cuenta la corriente de excitación del transformador de tres enrollados, es incluir entre el punto común de la Y equivalente y el punto común inferior, una admitancia igual a la que se obtiene excitando el transformador desde un enrollado con los otros dos en circuito abierto. El circuito equivalente se muestra en la Figura 9.

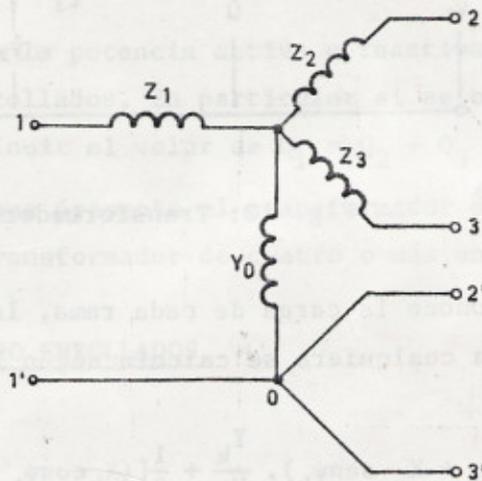


Fig. 9: Circuito equivalente con rama de excitación.

En realidad el circuito equivalente de la Figura 9 prácticamente no se usa ya que el circuito de la Figura 7 da resultados suficientemente exactos con mucho menos trabajo numérico.

5.- REGULACION DE TRANSFORMADORES DE TRES ENROLLADOS

Como la regulación (R_g) es una magnitud escalar, no una magnitud vectorial, las regulaciones producidas por dos impedancias en serie se pueden combinar algebraicamente. Así se tiene que:

$$\begin{aligned}
 (\% R_g)_{12} &= (\% R_g)_1 + (\% R_g)_2 \\
 (\% R_g)_{13} &= (\% R_g)_1 + (\% R_g)_3 \\
 (\% R_g)_{23} &= (\% R_g)_2 + (\% R_g)_3
 \end{aligned}
 \tag{17}$$

Es conveniente en este caso la representación del transformador mediante el circuito equivalente en estrella, esquematizado en la Figura 10. De este modo, la regulación por cada rama se puede poner:

$$(\% R_g)_k = \frac{|\dot{V}_k - \dot{U}|}{V_{kbase}} \cdot 100$$

siendo \dot{U} la tensión en el nudo común de la estrella y $k = 1, 2, 3, ..$

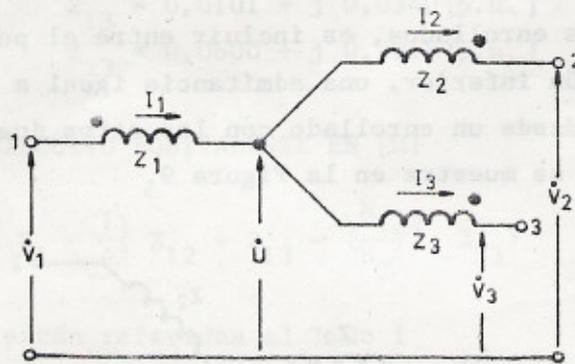


Fig. 10: Transformador cargado.

Si se conoce la carga de cada rama, la regulación producida por la impedancia de una rama cualquiera se calcula según la siguiente fórmula aproximada:

$$(\% R_g)_k = \left\{ (R_k \cos \psi_k + X_k \operatorname{sen} \psi_k) \cdot \frac{I_k}{V_k} + \frac{1}{2} [(X_k \cos \psi_k - R_k \operatorname{sen} \psi_k) \cdot \frac{I_k}{V_k}]^2 \right\} \cdot 100 \tag{18}$$

que corresponde a la generalización de la conocida expresión aplicable a transformadores de dos enrollados.

6. BALANCE DE POTENCIAS ACTIVAS Y REACTIVAS

Considérese el transformador de tres enrollados de la Figura 10. Trabajando en una base común, se tiene:

$$\dot{I}_1 = \dot{I}_2 + \dot{I}_3$$

Además si se desprecia la pequeña caída de voltaje en las impedancias de fuga del transformador (se desprecia la regulación) se cumple:

$$\overset{\circ}{V}_1 = \overset{\circ}{V}_2 = \overset{\circ}{V}_3 \quad (\text{referidos a la misma base})$$

La potencia aparente en el enrollado 1 vale:

$$\overset{\circ}{N}_1 = P_1 + jQ_1 = \overset{\circ}{V}_1 I_{\overset{\circ}{1}}$$

Como:

$$\overset{\circ}{I}_1 = \overset{\circ}{I}_2 + \overset{\circ}{I}_3$$

Entonces:

$$I_{\overset{\circ}{1}} = I_{\overset{\circ}{2}} + I_{\overset{\circ}{3}}$$

O sea:

$$P_1 + jQ_1 = \overset{\circ}{V}_1 (I_{\overset{\circ}{2}} + I_{\overset{\circ}{3}}) = \overset{\circ}{V}_2 I_{\overset{\circ}{2}} + \overset{\circ}{V}_3 I_{\overset{\circ}{3}} \quad (19)$$

$$P_1 + jQ_1 = P_2 + jQ_2 + P_3 + jQ_3$$

De lo anterior se deduce:

$$P_1 = P_2 + P_3 \quad (20)$$

$$Q_1 = Q_2 + Q_3$$

Así se ve que la potencia activa o reactiva se puede suministrar desde cualquiera de los enrollados. En particular si se hace Q_3 negativo (carga capacitiva), se puede disminuir el valor de $Q_1 = Q_2 + Q_3$ y por consiguiente mejorar el factor de potencia que presenta el transformador desde el enrollado 1. Algo similar sucede con un transformador de cuatro o más enrollados.

7. TRANSFORMADORES DE CUATRO ENROLLADOS

7.1.- Circuito equivalente

Es una necesidad física y matemática que el sistema (o circuito) equivalente debe disponer de tantos elementos independientes (grados de libertad) como el sistema (o circuito) original.

Un transformador de tres enrollados tiene tres impedancias de fuga independientes entre sus circuitos, con lo cual una malla de tres terminales con tres caminos independientes (conexión estrella) es completamente adecuada para re presentarlo.

En el caso de un transformador de cuatro enrollados, hay seis impedancias independientes entre sus enrollados (no cuatro), con lo cual para re presentarlo se necesita una malla de cuatro terminales con seis caminos independien

tes entre ellos. En general, para un transformador de n enrollados se requiere como circuito equivalente una malla de n terminales con $\frac{n(n-1)}{2}$ caminos independientes entre sus terminales. Dicho de otro modo, en el circuito equivalente de n terminales debe existir una trayectoria de conexión entre cada terminal y cualquier otro terminal. De acuerdo a lo expuesto anteriormente, el circuito equivalente para el transformador de cuatro enrollados será el de la Figura 11.

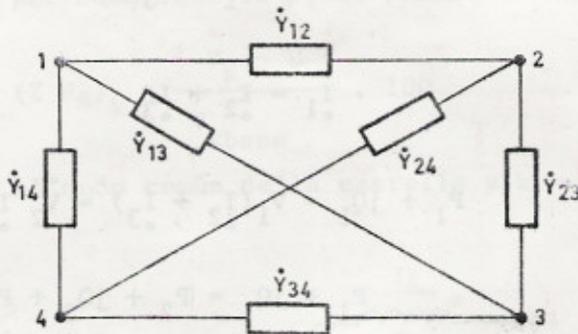


Fig. 11: Circuito equivalente para transformador de cuatro enrollados.

Debe notarse que en la Figura 11 no se ha representado los terminales "prima" ($1'$, $2'$, $3'$, $4'$) que formarían una malla similar pero con admitancias infinitas (impedancias nulas), lo que equivale a un único nudo eléctrico.

En el circuito equivalente y en el análisis de transformadores de cuatro a más enrollados, se conveniente, por motivos de simplicidad, trabajar con admitancias en lugar de impedancias.

7.2. Determinación de los parámetros del circuito equivalente

Supóngase que se excita el enrollado 1, manteniendo los enrollados 2, 3 y 4 cortocircuitados, tal como indica la figura 12. Se leen la tensión aplicada al enrollado 1 y las corrientes por cada uno de los restantes enrollados.

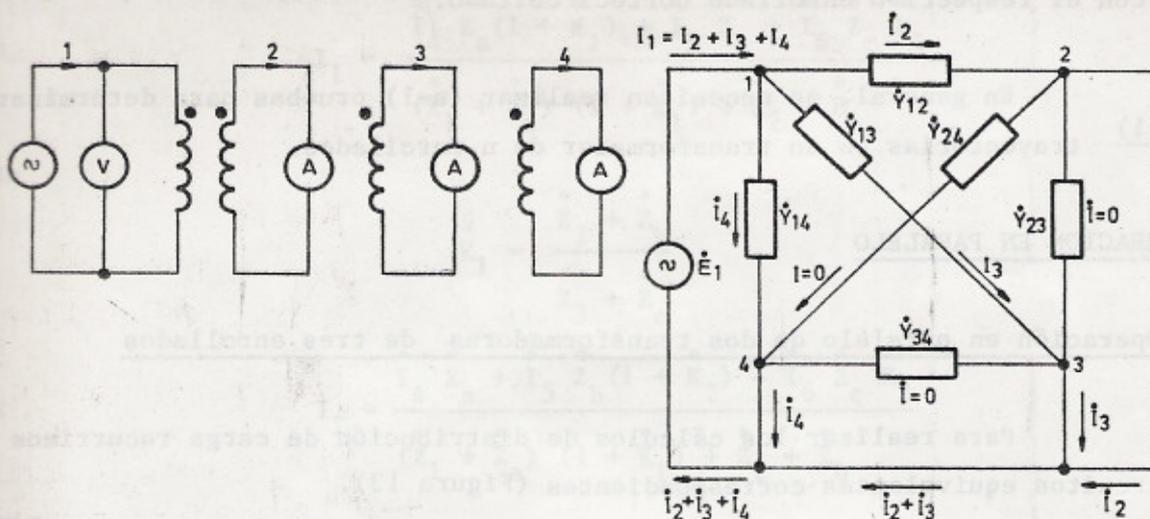


Fig. 12: Determinación Experimental de Parámetros.

Tal como se ha realizado la excitación del sistema, es evidente la distribución de corrientes en la malla equivalente. No debemos olvidar que las corrientes y voltajes se han reducido a una misma base; sólo bajo esa condición es posible aceptar que las ecuaciones que se colocan a continuación son válidas.

De acuerdo a las convenciones adoptadas, se cumple:

$$\begin{aligned} \overset{\circ}{I}_2 &= + \overset{\circ}{E}_1 \overset{\circ}{Y}_{12} \\ \overset{\circ}{I}_3 &= + \overset{\circ}{E}_1 \overset{\circ}{Y}_{13} \\ \overset{\circ}{I}_4 &= + \overset{\circ}{E}_1 \overset{\circ}{Y}_{14} \end{aligned} \quad (21)$$

lo cual permite determinar inmediatamente las tres admitancias que convergen a 1.

Además:
$$\overset{\circ}{I}_1 = \overset{\circ}{I}_2 + \overset{\circ}{I}_3 + \overset{\circ}{I}_4 \quad (22)$$

Luego:
$$\overset{\circ}{I}_1 = \overset{\circ}{E}_1 (\overset{\circ}{Y}_{12} + \overset{\circ}{Y}_{13} + \overset{\circ}{Y}_{14}) \quad (23)$$

Igualmente es posible desarrollar ecuaciones cuando la excitación al transformador se coloca en el enrollado 2 y se cortocircuitan los restantes enrollados. Se necesitan 3 pruebas análogas para determinar los 6 parámetros incógnitos.

Mediante el método descrito sólo es posible determinar las magnitudes de las admitancias; si se desea calcular parte real e imaginaria es necesario usar voltmetro, ampermetro y wáttmetro. Para este último instrumento, según sea la impedancia de transferencia a determinar, será necesario colocar la bobina

de voltaje en paralelo con la fuente de excitación y la bobina de corriente en serie con el respectivo enrollado cortocircuitado.

En general, se necesitan realizar $(n-1)$ pruebas para determinar $\frac{n(n-1)}{2}$ trayectorias en un transformador de n enrollados.

8. OPERACION EN PARALELO

8.1. Operación en paralelo de dos transformadores de tres enrollados

Para realizar los cálculos de distribución de carga recurrimos a los circuitos equivalentes correspondientes (Figura 13).

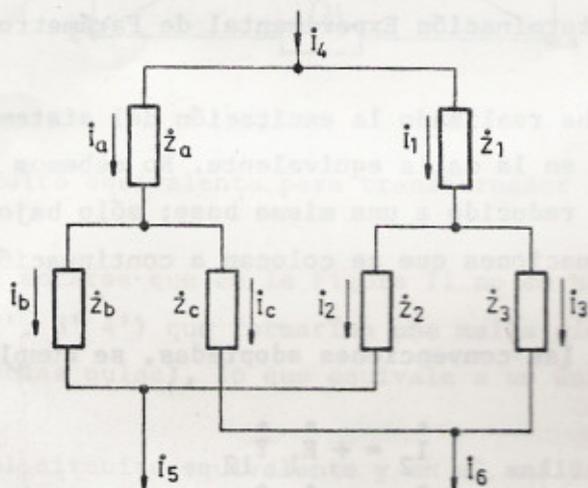


Fig. 13: Circuito equivalente para operación en paralelo.

Conocidos los circuitos equivalentes y las cargas $\overset{\circ}{i}_5$ e $\overset{\circ}{i}_6$ conectadas a los dos transformadores en paralelo, el problema se reduce a uno de circuitos de corriente alterna en el cual se conocen las corrientes $\overset{\circ}{i}_5$ e $\overset{\circ}{i}_6$ (y por lo tanto $\overset{\circ}{i}_4$) y las impedancias $\overset{\circ}{Z}_1, \overset{\circ}{Z}_2, \overset{\circ}{Z}_3, \overset{\circ}{Z}_a, \overset{\circ}{Z}_b$ y $\overset{\circ}{Z}_c$, siendo las incógnitas las corrientes $\overset{\circ}{i}_1, \overset{\circ}{i}_2, \overset{\circ}{i}_3, \overset{\circ}{i}_a, \overset{\circ}{i}_b$ e $\overset{\circ}{i}_c$.

Una relación de corrientes global determina inmediatamente:

$$\overset{\circ}{i}_4 = \overset{\circ}{i}_5 + \overset{\circ}{i}_6$$

Planteando adecuadamente las restantes ecuaciones, se llega a los siguientes resultados:

$$I_1 = \frac{\dot{I}_4 \dot{Z}_a (1 + \dot{K}_1) + \dot{I}_5 \dot{Z}_b + \dot{I}_6 \dot{Z}_c \dot{K}_1}{(\dot{Z}_1 + \dot{Z}_a) (1 + \dot{K}_1) + \dot{Z}_2 + \dot{Z}_b}$$

donde

$$\dot{K}_1 = \frac{\dot{Z}_2 + \dot{Z}_b}{\dot{Z}_3 + \dot{Z}_c} \quad (24)$$

$$I_2 = \frac{\dot{I}_4 \dot{Z}_a + \dot{I}_5 \dot{Z}_b (1 + \dot{K}_2) - \dot{I}_6 \dot{Z}_c \dot{K}_2}{(\dot{Z}_1 + \dot{Z}_a) (1 + \dot{K}_1) + \dot{Z}_2 + \dot{Z}_b}$$

siendo

$$\dot{K}_2 = \frac{\dot{Z}_1 + \dot{Z}_a}{\dot{Z}_3 + \dot{Z}_c} \quad (25)$$

$$\dot{I}_3 = \dot{I}_1 - \dot{I}_2 \quad (26)$$

$$\dot{I}_a = \dot{I}_4 - \dot{I}_1 \quad (27)$$

$$\dot{I}_b = \dot{I}_5 - \dot{I}_2 \quad (28)$$

$$\dot{I}_c = \dot{I}_6 - \dot{I}_3 \quad (29)$$

2. Operación en paralelo de un transformador de tres enrollados con uno de dos enrollados

Esta situación se ilustra en la Figura 14, en la cual el transformador A posee dos enrollados y el transformador B es de tres enrollados, con una segunda carga conectada en el terciario.

En la Figura 15 se tiene el planteamiento circuital de la distribución de carga entre los dos transformadores en paralelo: \overline{CM} : barra primaria; \overline{MN} : barra secundaria; A: terminal del terciario; las cargas conectadas se llamarán 1 y 2.

La división entre los dos transformadores de la carga suministrada a 1, depende de la impedancia de la trayectoria $(Z_c + Z_b)$ en paralelo con Z_{MN} ; la división de la carga suministrada a 2, depende de Z_c en paralelo con $(Z_b + Z_{MN})$.

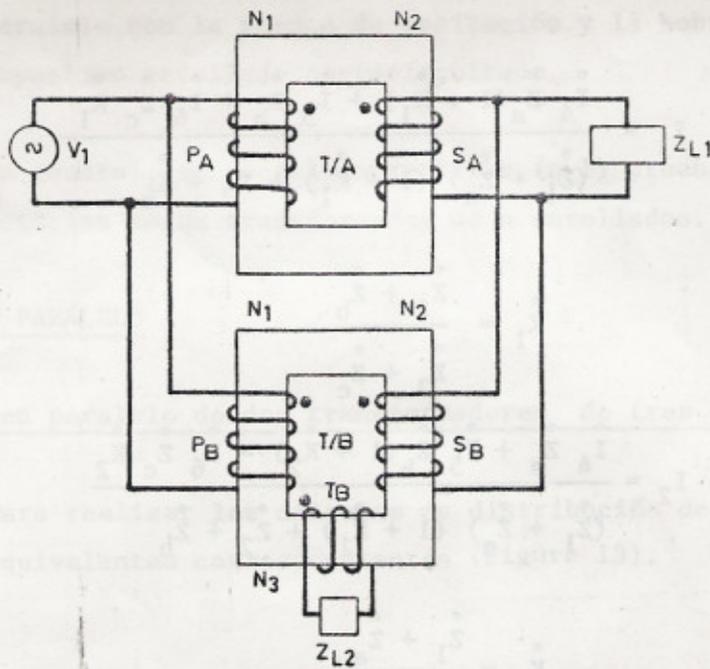


Fig. 14: Transformadores en paralelo.

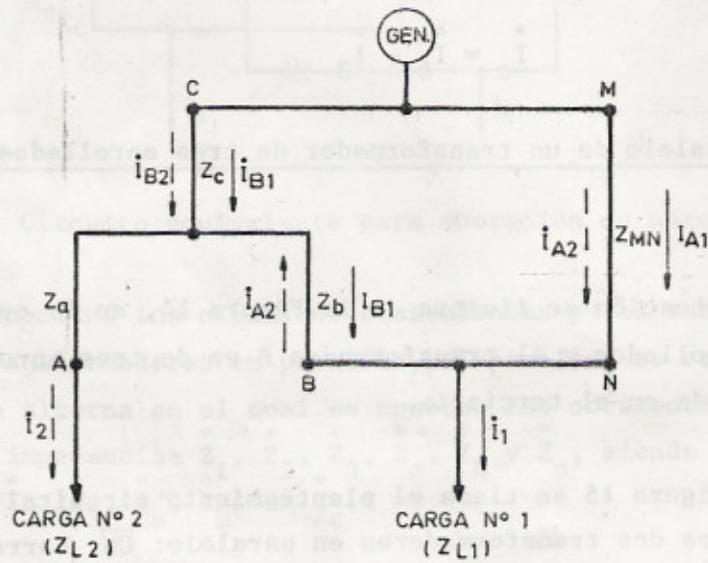


Fig. 15: Sistema equivalente de distribución de carga.

En ambos casos, la corriente se divide en trayectorias paralelas inversamente proporcional a las impedancias de esas trayectorias.

Esto significa por lo tanto que:

$$\begin{aligned}
 I_{A1} &= \frac{Z_c + Z_b}{Z_{MN} + Z_b + Z_c} I_1 \\
 I_{B1} &= \frac{Z_{MN}}{Z_{MN} + Z_b + Z_c} I_1 \\
 I_{A2} &= \frac{Z_c}{Z_{MN} + Z_b + Z_c} I_2 \\
 I_{B2} &= \frac{Z_b + Z_{MN}}{Z_{MN} + Z_b + Z_c} I_2
 \end{aligned} \tag{30}$$

Se puede observar muy claramente que en los enrollados equivalentes MN y c, las componentes de corriente de ambas cargas siempre se suman y en b siempre se restan, con lo cual hay menos carga en b cuando secundario y terciario están cargados que cuando solamente uno de ellos lo está.

Para la complementación de estas materias se sugiere recurrir a la bibliografía indicada.

9. BIBLIOGRAFIA

- [1] Langsdorf, A.S.: "Teoría de las máquinas de corriente alterna"; McGraw-Hill, 1971.
- [2] Kostenki, M., et al: "Máquinas eléctricas"; Vol. 1, Montaner y Simón, 1968.
- [3] Massachusetts Institute of Technology (M.I.T.): "Magnetic circuits and transformers"; Wiley, 1965.
- [4] Blume, L.F.: "Transformer Engineering"; Wiley, 1938.
- [5] "Conexiones trifásicas de transformadores"; Publicación N° 29 (C/4), Depto, Ingeniería Eléctrica, U. de Chile, Septiembre, 1982.

CONEXIONES TRIFASICAS DE TRANSFORMADORES

CONTENIDO

- INTRODUCCION
- 1.- INTRODUCCION.
 - 2.- GENERALIDADES.
 - 3.- REVISION DEL CONCEPTO DE POLARIDAD Y SU APLICACION A SISTEMAS TRIFASICOS.
 - 3.1.- Polaridad.
 - 3.2.- Definiciones y normas.
 - 4.- DIAGRAMAS VECTORIALES DE TENSION.
 - 4.1.- Introducción.
 - 4.2.- Grupo de conexión y desplazamiento angular.
 - 4.3.- Determinación del diagrama fasor y del grupo de conexión a partir de las conexiones y polaridad de los enrollados del transformador.
 - 4.4.- Determinación experimental del diagrama fasor.
 - 4.5.- Conexiones trifásicas más usuales en transformadores.
 - 5.- RAZON DE TRANSFORMACION.
 - 5.1.- Consideraciones generales.
 - 5.2.- Métodos para medir la razón de transformación.
 - 6.- PROPIEDADES DE LAS CONEXIONES TRIFASICAS MAS IMPORTANTES.
 - 6.1.- Conexión estrella- estrella (Yy).
 - 6.2.- Conexión delta-delta (Dd).
 - 6.3.- Conexión estrella-delta (Yd).
 - 6.4.- Conexión delta-estrella (Dy).
 - 6.5.- Conexión estrella-zig zag (Yz).
 - 6.6.- Conexión delta abierta o conexión en V.
 - 6.7.- Conexión estrella-estrella con terciario en delta (Y y d).
 - 6.8.- Resumen de las características más destacadas de conexiones trifásicas en transformadores.
 - 7.- BIBLIOGRAFIA.

CONEXIONES TRIFASICAS DE TRANSFORMADORES

1. INTRODUCCION

Por motivos principalmente económicos, casi la totalidad (sobre el 99%) de la energía eléctrica se produce y transporta en sistemas trifásicos de tensiones (aunque se prevee un aumento de la transmisión en C.C. de grandes bloques de energía a través de grandes distancias). La transmisión y distribución de la energía eléctrica se basa fundamentalmente en los transformadores trifásicos.

La función básica de los transformadores en circuitos trifásicos, es cambiar el nivel de las tensiones (y corrientes) del sistema trifásico. Esto es posible intercalando en cada una de las tres fases un transformador monofásico o usando un transformador trifásico. En esta publicación se analizarán los modos de conexión de las bobinas de estos transformadores al ser usados en un sistema trifásico.

2. GENERALIDADES

En la Figura 1 se muestran 3 transformadores monofásicos conectados a un sistema trifásico primario R-S-T, de voltaje V_1 (entre fases), y alimentando un sistema trifásico secundario r-s-t, de voltaje V_2 (entre fases). Es lo que se denomina banco trifásico de transformadores monofásicos.

En la Figura 2 se muestra un transformador trifásico propiamente tal, del tipo acorazado, conectado a un sistema idéntico al anterior. En este caso, existen superposiciones del flujo magnético provocado por una fase con los de las otras fases, no existiendo entonces independencia magnética entre las fases del sistema trifásico.

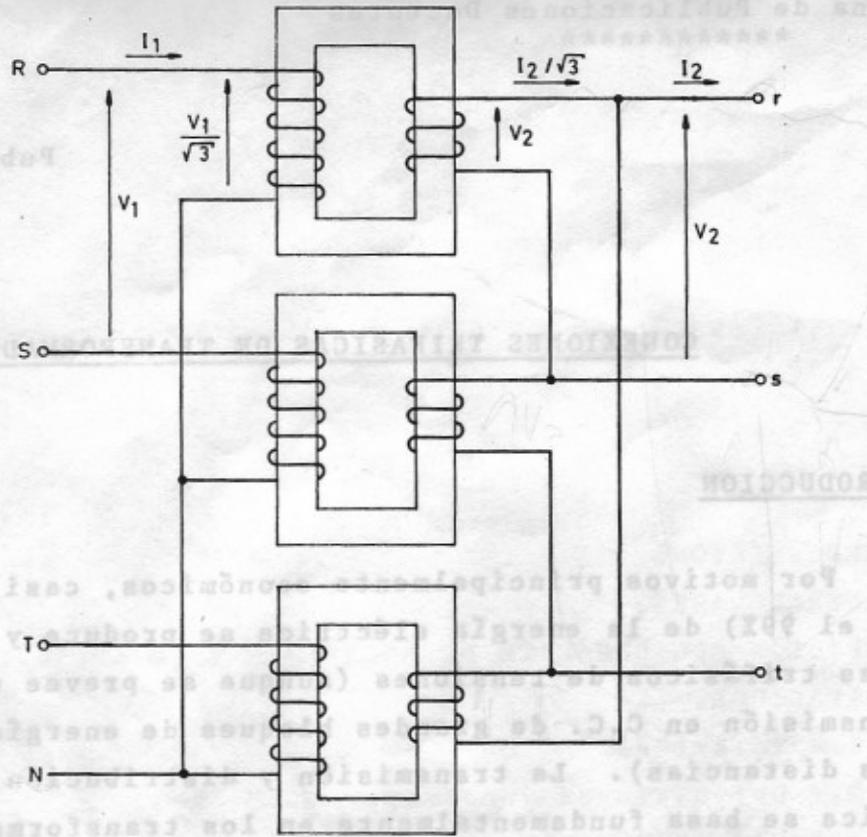


Figura 1: Tres transformadores monofásicos en un sistema trifásico conectados en Y-Δ.

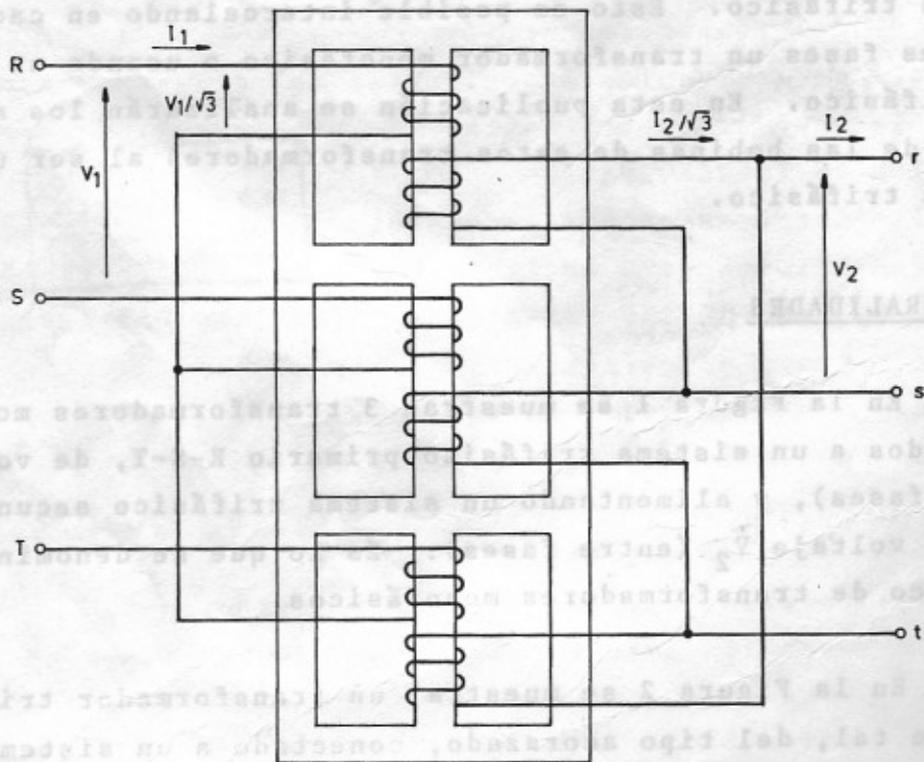


Figura 2: Transformador trifásico, tipo acorazado, en un sistema trifásico.

En general, las bobinas tanto del primario como del secundario pueden conectarse en estrella (Y) o en delta (Δ), dando lugar a las siguientes conexiones (primero el lado de alta tensión (A.T), y luego el de baja tensión (B.T)): YY, Y Δ , Δ Y, $\Delta\Delta$.

Existen también otras conexiones trifásicas como la conexión T, la delta abierta o conexión en V y la conexión Z.

Por último hay una gran variedad de conexiones entre sistemas trifásicos y bifásicos (Le-blanc y Scott), entre trifásicos y hexafásicos (doble Y por ejemplo), etc., las cuales no son tratadas en esta publicación.

3. REVISIÓN DEL CONCEPTO DE POLARIDAD Y SU APLICACION A SISTEMAS TRIFASICOS

3.1.- Polaridad

Tensión H₁H₂ en fase con X₁X₂

El concepto de polaridad relaciona dos bobinas que poseen un flujo magnético común.

Se dice que el terminal H₁ (de la bobina 1) tiene igual polaridad que el terminal X₁ (de la bobina 2) si la tensión entre H₁-H₂ está en fase (o lo está muy aproximadamente) con la tensión entre X₁-X₂. (designación según norma A.S.A.; ver Figura 3).

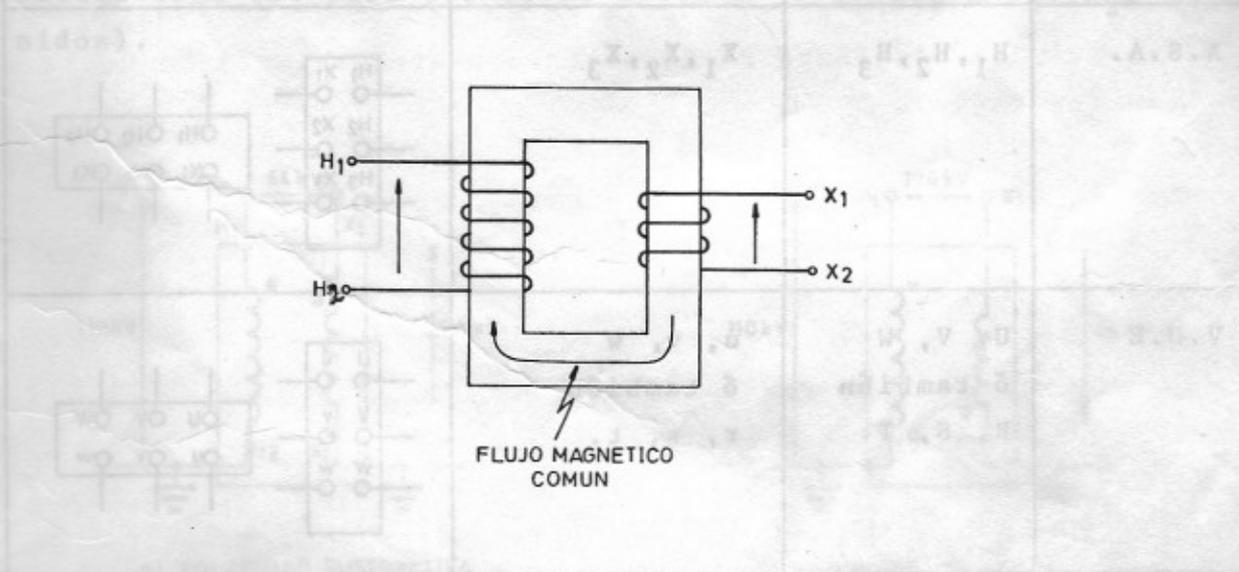


Figura 3: Dos bobinas con flujo magnético común.

Los métodos para la determinación de la polaridad están contenidos en la publicación "Transformadores monofásicos de dos

enrollados" [6].

3.2. - Definiciones y normas

En este párrafo se darán algunas definiciones y notaciones, todas ellas indicadas en normas técnicas. Las normas técnicas eléctricas más usadas en nuestro país son las NCH (normas chilenas), la IEC (International Electrotechnical Commission), las VDE (normas alemanas), las ASA (American Standard Association), las NEMA (National Electrical Manufacturers Association) y las normas B.S. (British Standards).

En el cuadro de la Figura 4 se muestran las designaciones, representación y ubicación de los bornes en la tapa del transformador, según algunas de las normas antes señaladas.

Norma	Bornes de A.T.	Bornes de B.T.	Disposición de los bornes y del esquema
I.E.C. N.CH. B.S.	A, B, C	a, b, c	
A.S.A.	H ₁ , H ₂ , H ₃	X ₁ , X ₂ , X ₃	
V.D.E	U, V, W ó también R, S, T.	u, v, w ó también r, s, t.	

Figura 4: Designaciones de bornes de transformadores según las normas más usadas.

En Chile cada empresa utiliza de preferencia una de estas normas, de acuerdo a la procedencia de sus equipos y a su tradición. Sin embargo, la tendencia mundial es emplear las normas I.E.C.

En el cuadro anterior, para la norma I.E.C, las fases de A.T. se denotan A,B,C y las correspondientes a B.T. a, b, c. En la norma A.S.A, las fases serán 1, 2,3 y los bornes de A.T. serán H y los de baja X.

La norma I.E.C define como "bornes homólogos" a aquellos (uno en A.T. y el otro en B.T.) designados con la misma letra. Nótese que los bornes homólogos pueden ser de igual polaridad o de polaridad opuesta.

En la norma A.S.A serán homólogos aquellos que tengan igual subíndice.

Un transformador tendrá polaridad sustractiva cuando sus bornes homólogos tengan igual polaridad, y tendrá polaridad aditiva cuando éstos sean de polaridad opuesta.

En la Figura 5 se muestra, a través de un ejemplo, que para el caso de operación normal, la gradiente de potencial entre los enrollados de A.T. y los de B.T. es menor para polaridad sustractiva que para polaridad aditiva (con terminales H₂, X₂ unidos).

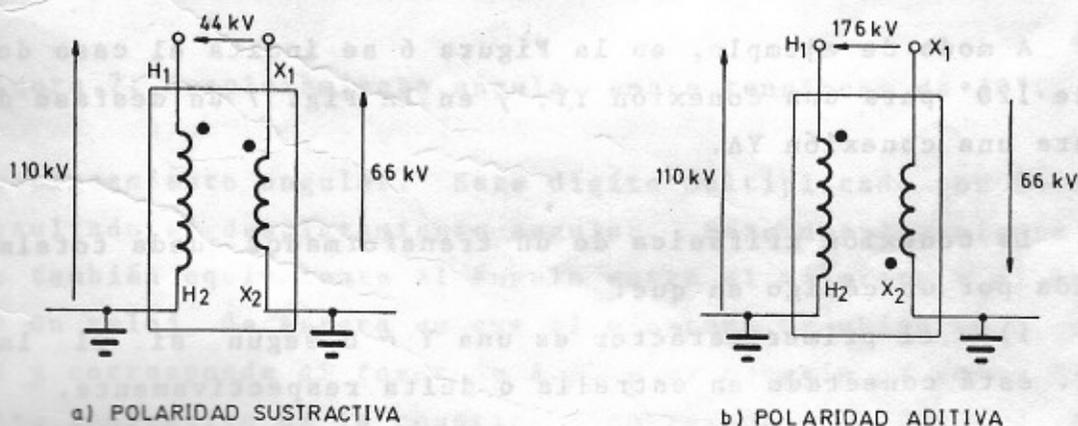


Figura 5: Gradiente de tensión que soporta la aislación entre enrollados para distintas polaridades.

4. DIAGRAMAS VECTORIALES DE TENSION

4.1.- Introducción

Para relacionar las tensiones y/o corrientes primarias con las secundarias, no basta en los sistemas trifásicos con la relación de transformación, sino que se debe indicar los desfases relativos entre las tensiones de una misma fase entre el lado de A.T. y B.T. Un modo de establecer estos desfases consiste en construir los diagramas fasoriales de tensiones y corrientes, conocidos: la conexión de ambos lados (A.T. y B.T.) ya sea Δ o Y; las polaridades de los enrollados en un mismo circuito magnético o fase; y las designaciones de los bornes.

En los diagramas fasoriales se indican tanto los fasores de A.T. como los de B.T., y ambos se construyen para secuencia positiva (de tensiones) considerando: las polaridades, la designación de los bornes y, por supuesto la conexión. Si se considera secuencia negativa para tensiones, los resultados serán, en general, distintos de los obtenidos para secuencia positiva.

4.2.- Grupo de conexión y desplazamiento angular.

Se define como desplazamiento angular el desfase entre tensiones homólogas (i.e.: entre bornes homólogos) medido desde A.T. hacia B.T. Es decir, es el ángulo en que el fasor de tensión fase-neutro primario adelanta al fasor fase-neutro secundario de la misma fase (en vacío).

A modo de ejemplo, en la Figura 6 se indica el caso de desfase de 120° para una conexión YY, y en la Fig. 7 un desfase de 30° para una conexión Y Δ .

La conexión trifásica de un transformador queda totalmente definida por un código en que:

- i) el primer carácter es una Y o D según si el lado de A.T. está conectado en estrella o delta respectivamente.
- ii) la segunda letra indica la conexión del lado de baja tensión y puede ser, similarmente, y o d.
- iii) el tercer carácter es un dígito de 0 a 11 indicando el

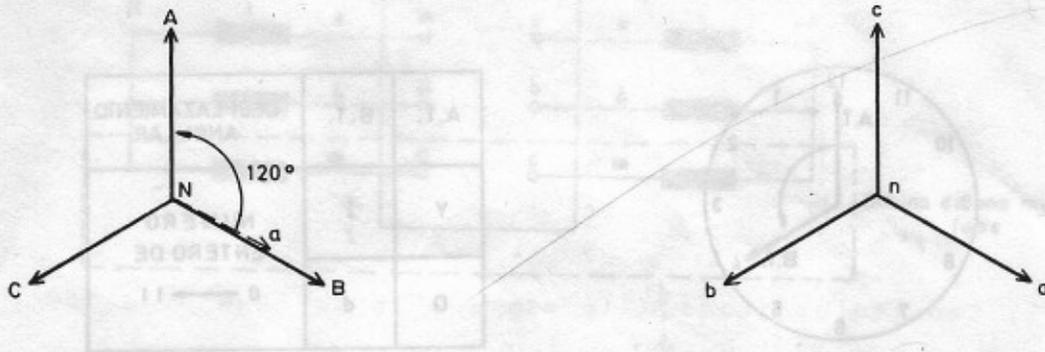


Figura 6: Desplazamiento angular entre tensiones de 120°

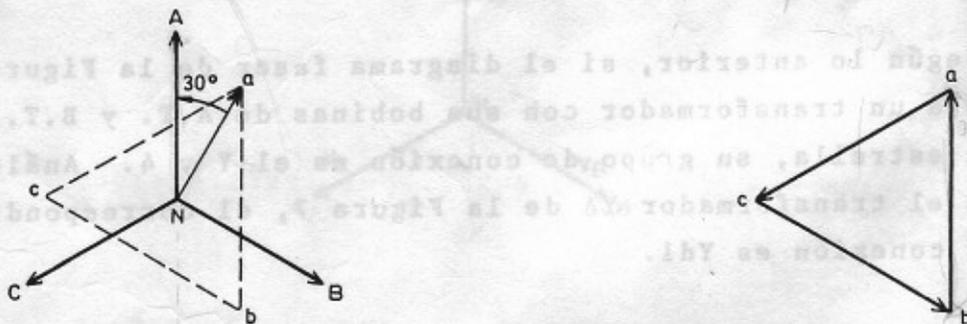


Figura 7: Desplazamiento angular entre tensiones de 30°. YA

desplazamiento angular. Este dígito multiplicado por 30° da como resultado el desplazamiento angular. Este desplazamiento angular es también equivalente al ángulo entre el minuterero y el horario de un reloj de esfera en que el minuterero se ubica en el número 12 y corresponde al fasor de A.T. y el horario se ubica en el dígito indicativo de la conexión y corresponde al fasor de B.T. (ver Figura 8).

4.1.- Introducción

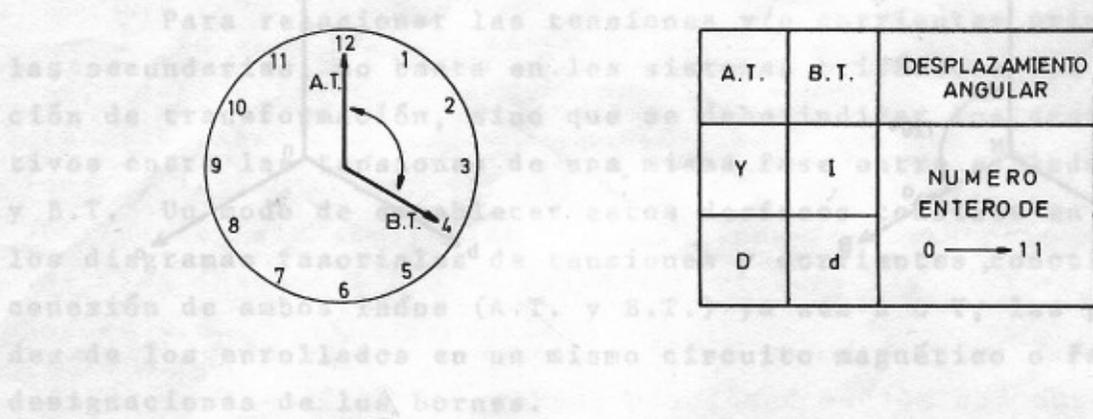


Figura 8: Dígito indicador del desplazamiento angular y notación para los grupos de conexión.

Según lo anterior, si el diagrama fasor de la Figura 6 corresponde a un transformador con sus bobinas de A.T. y B.T. conectadas en estrella, su grupo de conexión es el Y y 4. Análogamente, para el transformador YΔ de la Figura 7, el correspondiente grupo de conexión es Yd1.

4.3.- Determinación del diagrama fasor y del grupo de conexión a partir de las conexiones y polaridad de los enrollados del transformador.

Dadas las conexiones y polaridad de las bobinas de un transformador en un circuito trifásico (Ejemplo Figura 9), para determinar su grupo de conexión se procede como sigue:

- a) Se determinan, por inspección, las conexiones en A.T. y en B.T. En el caso de la Figura 9 ambas son estrella, y por lo tanto se puede escribir Yy.
- b) Se construye el diagrama fasor de las tensiones. Para ello debe darse un sistema de tensiones para el lado de A.T. de secuencia positiva, como el de la Figura 10.

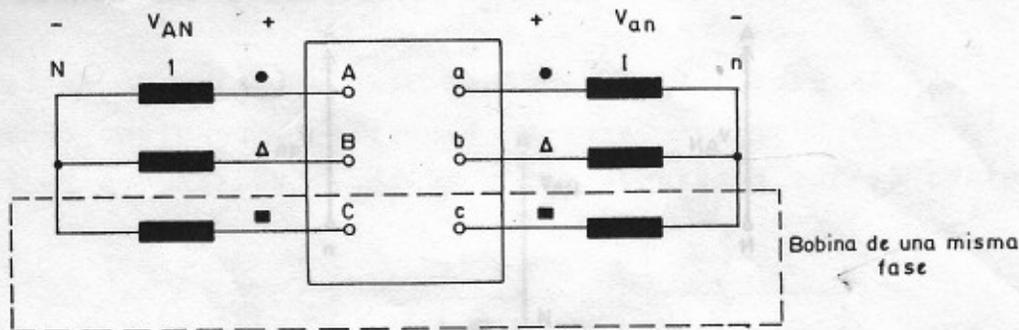


Figura 9: Conexiones y polaridad de un transformador trifásico.

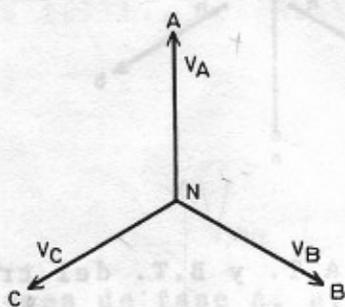


Figura 10: Sistema de tensiones primarias de secuencia positiva.

Con ayuda de las Figuras 9 y 10, puede verse que: el enrollado 1 está en la misma fase que el enrollado I del secundario; 1 tiene aplicada la tensión V_{AN} (o V_A) positiva (A con respecto a N). Por lo tanto, en I se inducirá una tensión en fase con la anterior (Figura 11) positiva (a con respecto a n), ya que A y a son de igual polaridad.

Similarmente para los enrollados de las fases B y C de A.T. y B.T., obteniéndose los diagramas de la Figura 12.

De la Figura 12 se encuentra que el desplazamiento angular es cero, por lo tanto el grupo de conexión es Yy0.

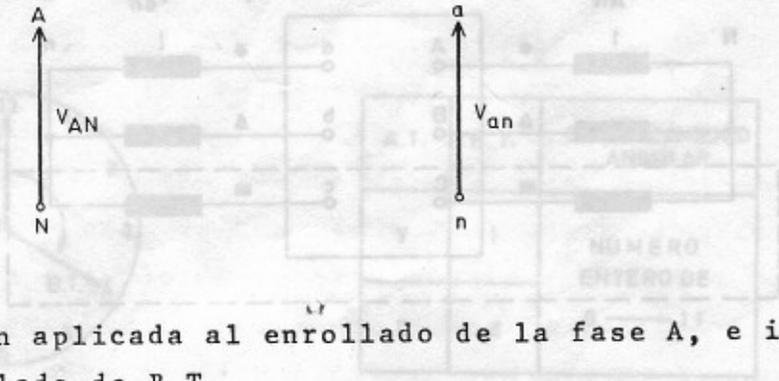


Figura 11: Tensión aplicada al enrollado de la fase A, e inducida en el lado de B.T.

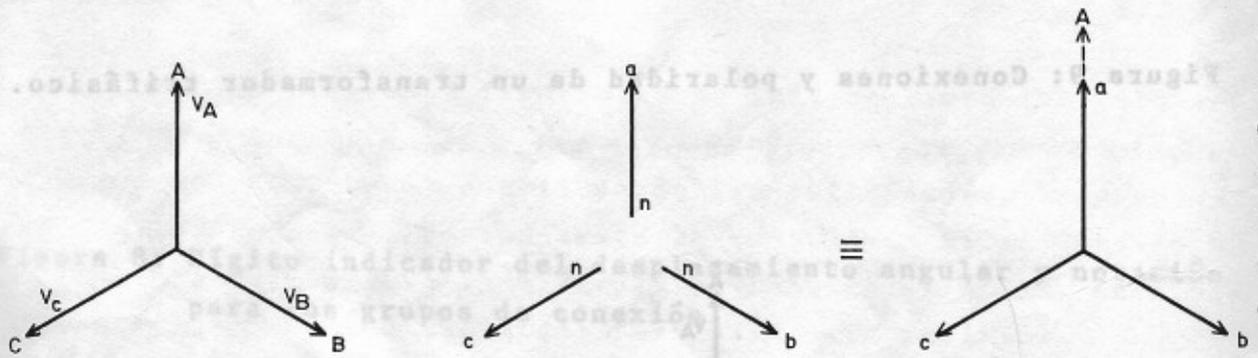


Figura 12: Diagrama fasor de A.T. y B.T. del transformador de la Figura 9.

Otro ejemplo se ilustra en el banco de transformadores de la Figura 13. En este caso la conexión es Yy, y el diagrama

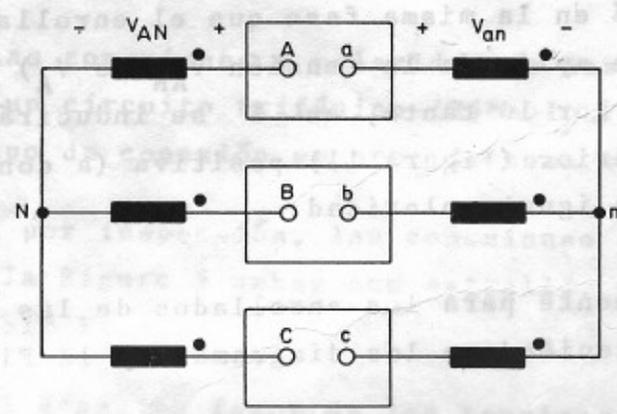


Figura 13: Banco Trifásico Yy.

fasor se obtiene de la Figura 14, a partir del cual para la fase a se tienen las tensiones indicadas en la Figura 15.

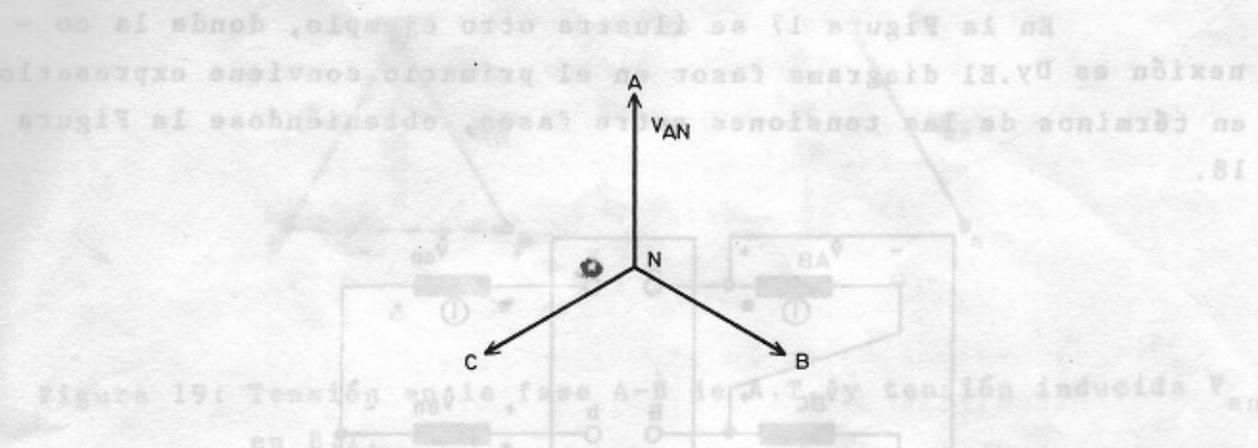


Figura 14: Tensiones primarias del transformador de la Figura 13.

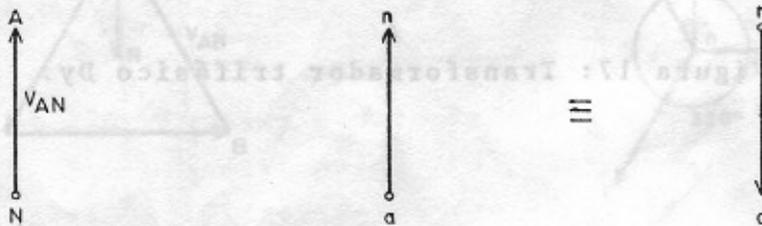


Figura 15: Tensiones de fase A, a, del transformador de la Figura 13.

Procediendo similarmente para las otras fases, se obtienen finalmente los diagramas de la Figura 16, donde se concluye:

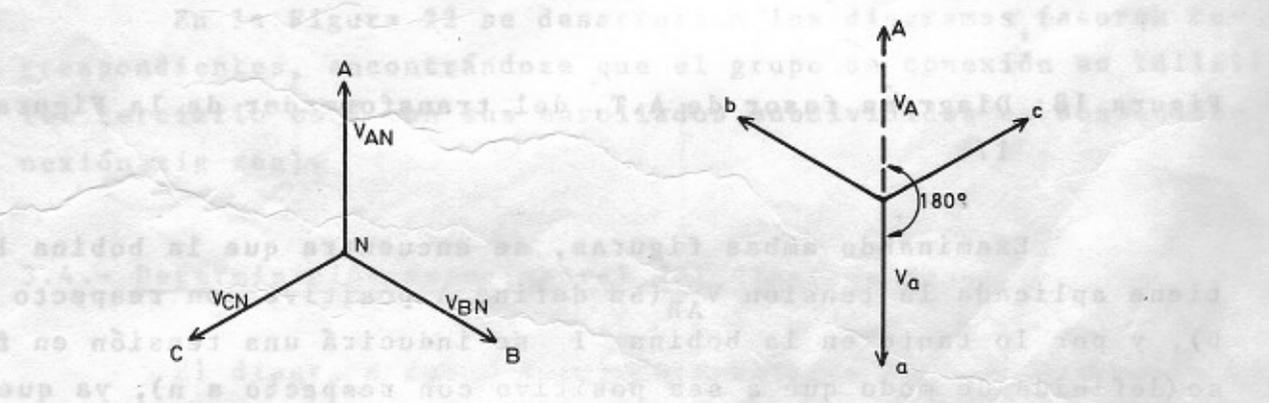


Figura 16: Diagrama fasor de las tensiones de .A.T. y de B.T. (Nótese que ambos son de secuencia positiva).

que el grupo de conexión es 6, (desfase de 180 °) es decir Yy6

En la Figura 17 se ilustra otro ejemplo, donde la conexión es Dy. El diagrama fasor en el primario conviene expresarlo en términos de las tensiones entre fases, obteniéndose la Figura 18.

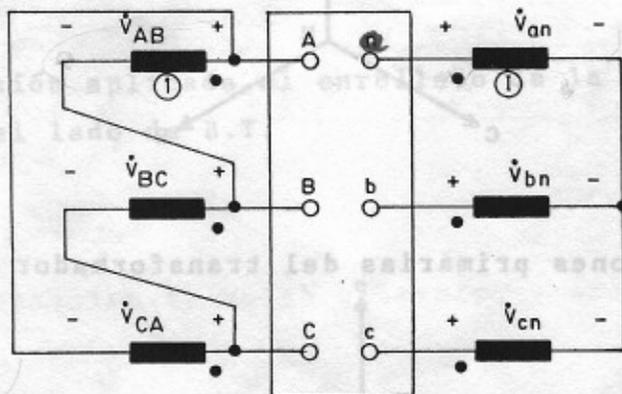


Figura 17: Transformador trifásico Dy.

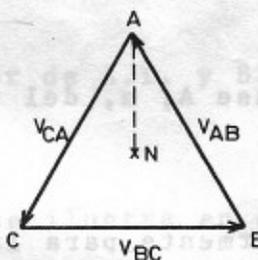


Figura 18: Diagrama fasor de A.T. del transformador de la Figura 17.

Examinando ambas figuras, se encuentra que la bobina 1 tiene aplicada la tensión V_{AB} (se define A positivo con respecto a B), y por lo tanto en la bobina 1 se inducirá una tensión en fase (definida de modo que a sea positivo con respecto a n), ya que A y a tienen igual polaridad. La Figura 19 muestra esta situación.

Al extender el análisis a las restantes fases, se obtiene el diagrama de la Figura 20, resultando el grupo de conexión

Dy11.

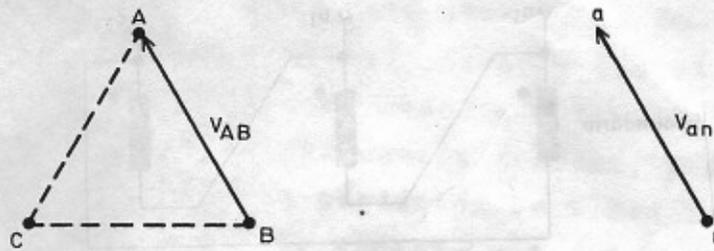


Figura 19: Tensión en la fase A-B de A.T. y tensión inducida V_{an} en B.T.

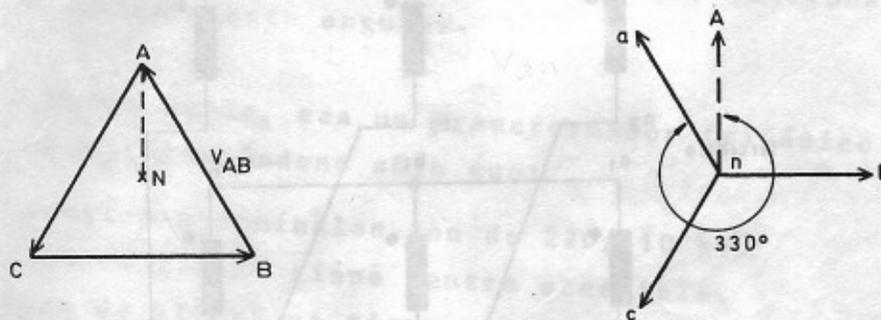


Figura 20: Diagrama fasor de la conexión de la Figura 17.

Como último ejemplo, considérese el transformador de cuatro enrollados de la Figura 21, en el que se desea determinar el grupo de conexión del secundario y del terciario.

En la Figura 22 se desarrollan los diagramas fasores correspondientes, encontrándose que el grupo de conexión es Yd11z11 (el terciario está con sus enrollados subdivididos en dos, en conexión zig zag).

3.4.- Determinación experimental del diagrama fasor

El diagrama fasor puede determinarse experimentalmente mediante medidas de tensión alterna entre los bornes de A.T. y B.T. Para ello debe conectarse entre sí un borne de A.T. con uno de B.T. Normalmente, no hay peligro al hacer esta conexión, excepto cuando ya existe una conexión similar (como por ejemplo en los au

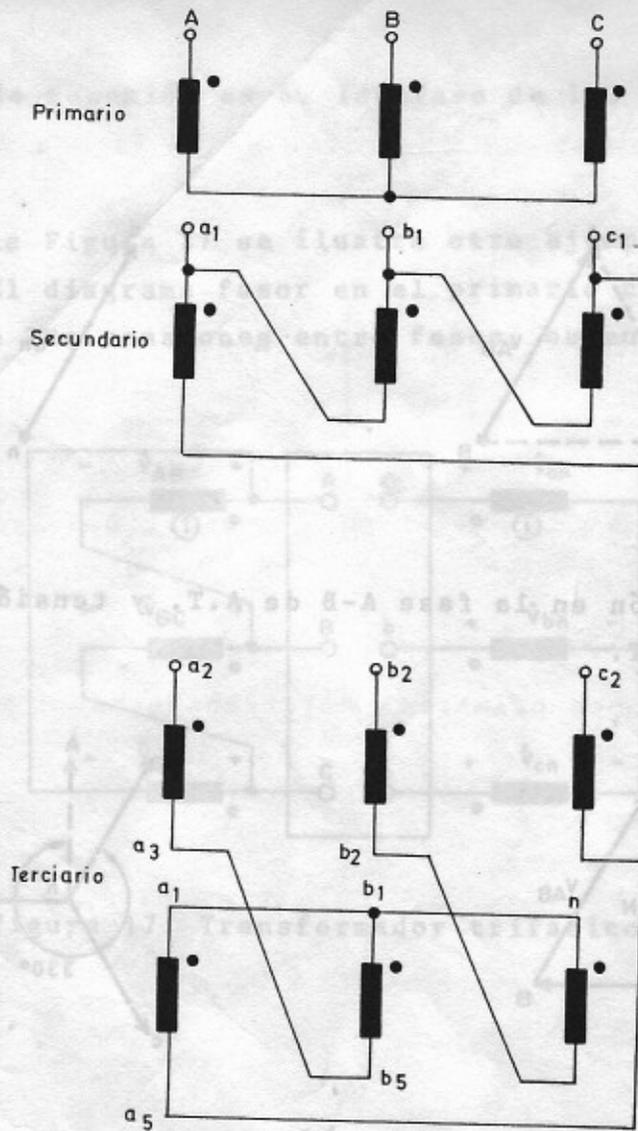


Figura 21: Transformador trifásico con cuatro enrollados.

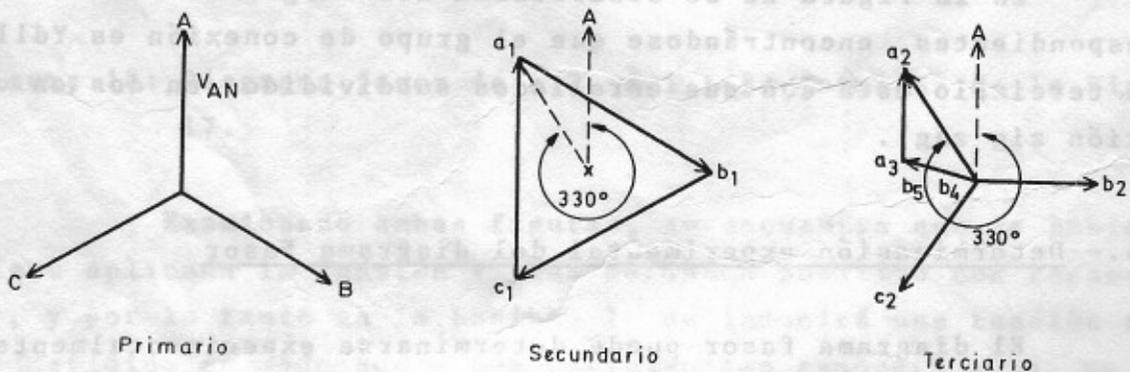


Figura 22: Diagramas fasoriales del transformador de la Figura 21.

totransformadores).

En general, para esta prueba, se prefiere conectar los neutros si están accesibles. Luego y con el transformador en vacío se alimenta uno de los lados con tensión trifásica igual o menor a la nominal, a frecuencia nominal, y de secuencia conocida (positiva). En esta condición se miden las tensiones entre los bornes libres del secundario y las fases de alimentación del primario.

Conociendo la secuencia y la magnitud de las tensiones de alimentación y dibujando a escala las tensiones medidas, es posible construir el diagrama fasor de las tensiones y determinar el desplazamiento angular.

Por ejemplo, sea un transformador trifásico cuya conexión se desconoce, sabiéndose sólo que:

- a) Sus tensiones nominales son de 220/110 kV.
- b) El lado de 220 kV tiene neutro accesible.
- c) El lado de 110 kV no tiene neutro accesible.
- d) No hay conexiones eléctricas entre el primario y el secundario.
- e) Cuando se alimentó en A.T. con 173,2 kV, simétricos y equilibrados, de secuencia positiva, a frecuencia nominal, y conectando el borne a del secundario al neutro primario, se midieron las siguientes tensiones:

$$\begin{array}{l}
 1) \quad \left. \begin{array}{l} V_{Cc} = 86,6 \text{ kV} \\ V_{Bc} = 86,6 \text{ kV} \\ V_{Ac} = 150,0 \text{ kV} \end{array} \right\} \text{(permiten determinar } V_{ac}) \\
 \\
 \left. \begin{array}{l} V_{Cb} = 139,19 \text{ kV} \\ V_{Bb} = 50,0 \text{ kV} \\ V_{Ab} = 108,97 \text{ kV} \end{array} \right\} \text{(permiten determinar } V_{ab})
 \end{array}$$

Como el borne a coincide con el neutro primario, se tiene que $V_{Aa} = V_{AN} = 173,2 / \sqrt{3} \text{ kV} = 100 \text{ kV}$; $V_{Ba} = V_{BN} = 100 \text{ kV}$; $V_{Ca} = V_{CN} = 100 \text{ kV}$.

Entonces, se construye primeramente, y a escala, el diagrama fasor del primario (en este caso A.T., Figura 23(a)). Luego, sobre ella y para determinar el punto c del secundario, se

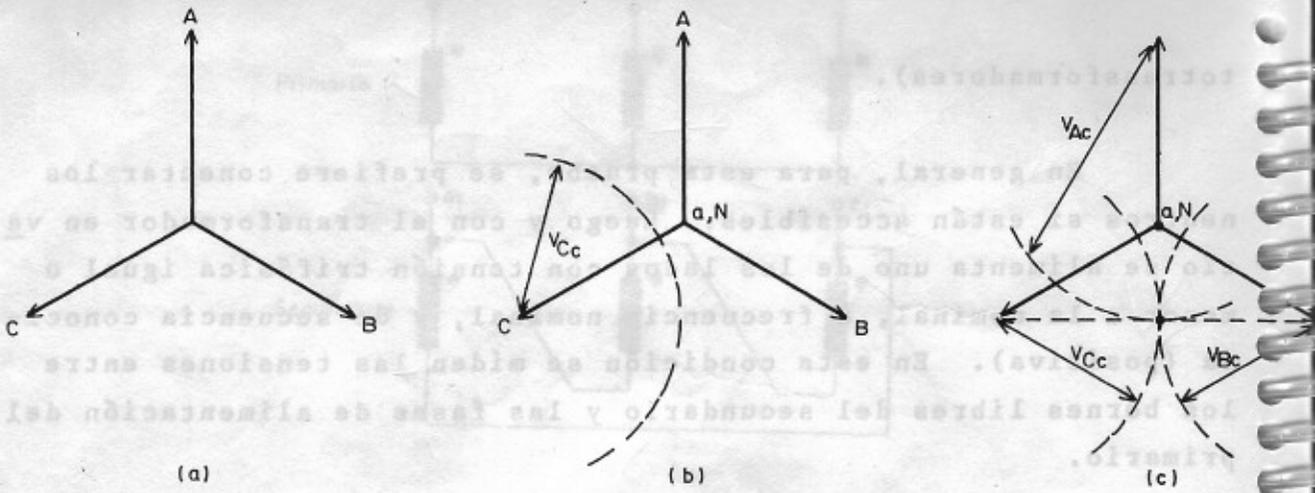


Figura 23: Determinación del diagrama fasor del secundario a partir de datos experimentales.

traza un círculo de radio $V_{Cc} = 86,6 \text{ kV}$, con centro en C. (Figura 23 (b)). Luego con centro en B y en A se trazan círculos con radios V_{Bc} y V_{Ac} respectivamente, determinando, en el punto de corte, el punto c del diagrama fasor secundario.

Lo anterior y la secuencia son suficientes para determinar el diagrama fasor de las tensiones secundarias, y por ende el desplazamiento angular. (ver Figura 24).

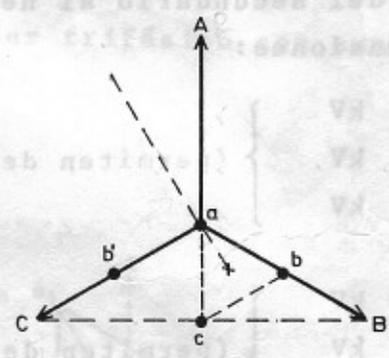


Figura 24: Construcción experimental del diagrama fasor.

NOTA: El punto b' forma un Δ equilátero con a y c , pero da lugar a una secuencia opuesta a la de alimentación.

De la Figura 24 se determina finalmente que el grupo de conexión puede ser: $Yd11$, $Zy11$, o $Yz11$, pues:

- 1.- al ser 11 el desplazamiento angular sólo son posibles conexiones Y- Δ ó Y-Z.
- 2.- el lado de A.T. debe ser Y ó Z ya que tiene neutro.

Sin embargo, es más probable que la conexión sea Yd11 ya que el uso de la Z es bastante menos frecuente, y además para fines de conexión (por ejemplo, en paralelo con otras unidades) y/o estudio de redes basta conocer el desplazamiento angular.

3.5.- Conexiones trifásicas más usuales en transformadores

El cuadro de la Figura 25 muestra los detalles de las conexiones trifásicas más usadas en transformadores y el desplazamiento angular de cada una de ellas.

En dicha figura, en los diagramas de conexión, los bornes se han designado por I, II, III y i), ii), iii), sólo con fines de ilustración, ya que los símbolos usados en la designación de los bornes varían entre los diversos países y normas (ver párrafo 2.2).

En la Figura 25 se indican las conexiones usuales según la norma alemana VDE 0532/8.64 9. 3. Las conexiones en recuadro corresponden a las que se está dando preferencia en nuevas instalaciones.

4.- RAZON DE TRANSFORMACION

4.1.- Consideraciones generales

Razón de transformación es la razón que existe entre el número de vueltas del primario y el número de vueltas del secundario.

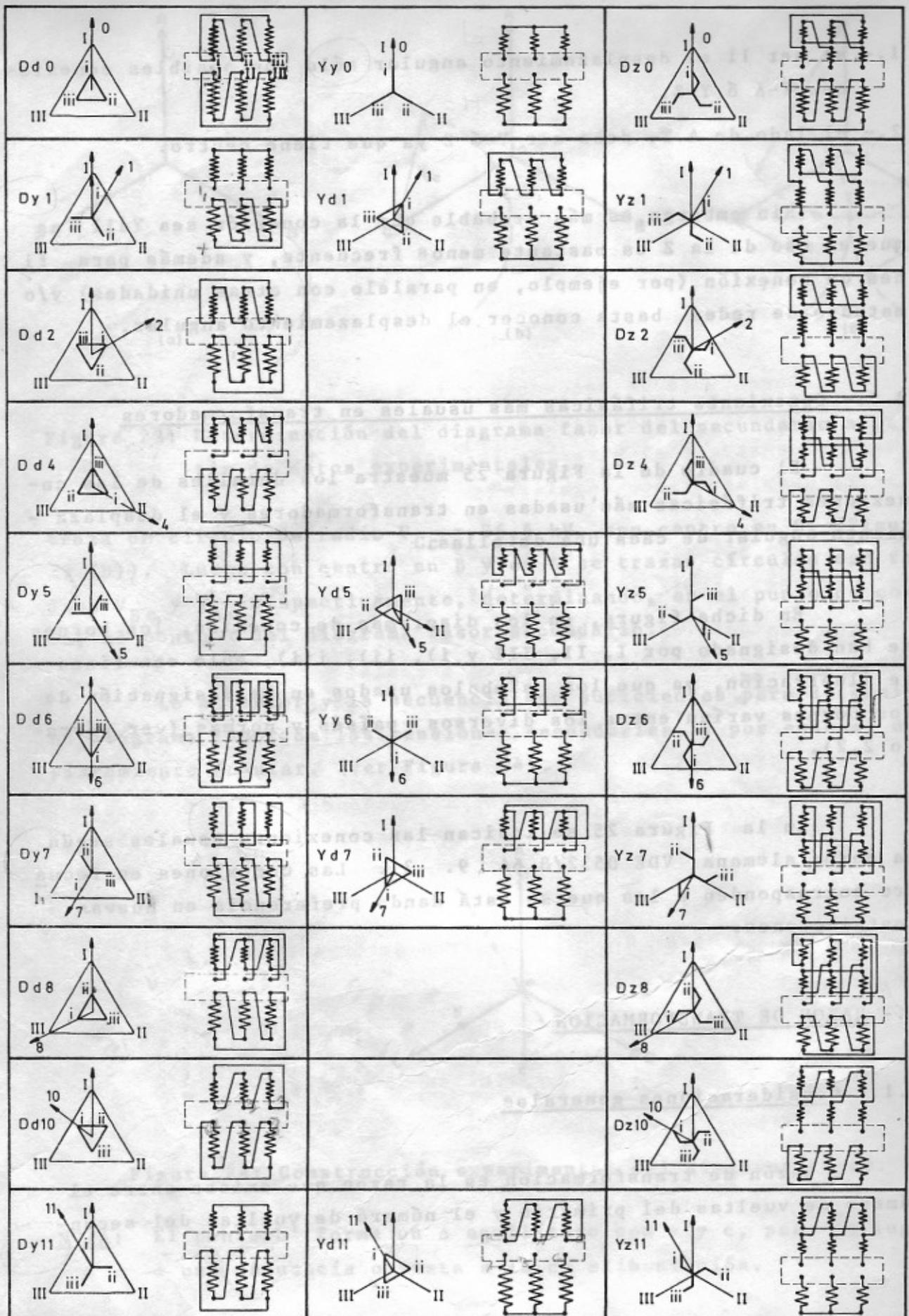


Figura 25: Conexiones trifásicas más usuales en transformadores según normas I.E.C. - 76. [2]

DESIGNACION		DIAGRAMA VECTORIAL		DIAGRAMA DE CONEXION	
INDICE NUMERICO	GRUPO DE CONEXION	A.T.	B.T.	A.T.	B.T.
0	Dd 0				
	Yy 0				
	Dz 0				
5	Dy 5				
	Yd 5				
	Yz 5				
6	Dd 6				
	Yy 6				
	Dz 6				
11	Dy 11				
	Yd 11				
	Yz 11				

NOTA: En los diagramas de conexión en que no se indica la polaridad de los enrollados se supone que ésta es sustractiva, a menos que se indique explícitamente lo contrario.

Figura 26: Conexiones trifásicas más usuales en transformadores según VDE 0532/8.64 9 [3]

dario. Las recomendaciones generales para medirla son:

a) La medida de la razón de transformación debe efectuarse a la tensión de trabajo, o, menor, y deberá hacerse en todos los taps del transformador. Los transformadores que tienen 500 Watts o menos y que tienen una corriente de excitación mayor que el 10% serán probados sólo a tensión y frecuencia nominal.

b) En transformadores trifásicos en los cuales se tiene acceso al neutro, se puede medir la razón aplicando una fuente monofásica de tensión.

c) En transformadores trifásicos conectados en estrella y cuyo punto neutro primario es inaccesible, se aplica tensión trifásica y se mide en forma monofásica las tensiones por línea.

4.2.- Métodos para medir la razón de transformación

Existen tres métodos para medir la razón de transformación: éstos son:

- i) Método de Vóltmetro
- ii) Método de Transformador Patrón
- iii) Método de Resistencia Potenciométrica

4.2.1.- Método de Vóltmetro

Deben usarse dos vóltmetros, uno para leer la tensión del enrollado de alta tensión y el otro para leer el de baja. Los vóltmetros deben leerse simultáneamente. Una segunda lectura debe hacerse intercambiando los vóltmetros para compensar el error de los instrumentos, tomándose el valor promedio de las dos medidas.

Las medidas deben repetirse para no menos de 4 niveles de tensión con diferencia de 10% entre ellas.

El promedio de las medidas deberá tomarse como el verdadero valor. Todos los valores obtenidos deberán estar dentro del 1% del valor verdadero y si así no sucediera, las pruebas deberán repetirse con otros vóltmetros.

4.2.2.- Método de Transformador-Patrón

Un método más exacto para la medida de la razón de transformación de un transformador es comparándolo con un transformador patrón de razón conocida.

El transformador en prueba es excitado en paralelo con un transformador patrón de igual razón nominal y los dos secundarios conectados en paralelo, pero con un voltmetro detector conectado entre dos terminales de igual polaridad (Fig.27). Este es el método más adecuado porque el voltmetro indica la diferencia en Volts.

El transformador en prueba también puede ser excitado en paralelo con un transformador de razón conocida, pero usando dos voltmetros para medir los voltajes secundarios a comparar (Fig. 27b). La prueba deberá repetirse intercambiando los voltmetros y el término medio de las medidas será la razón correcta.

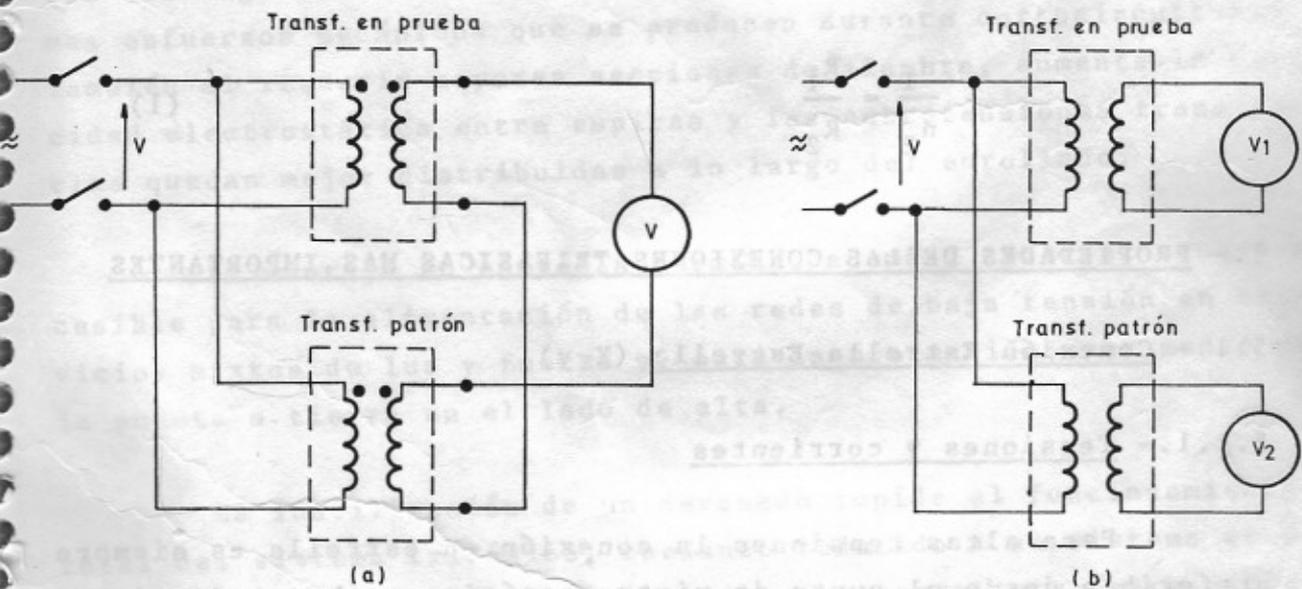


Figura 27: Método del Transformador Patrón.

4.2.3.- Método de Resistencia Potenciométrica

Una resistencia potenciométrica de rango adecuado, graduada, en los posible en la razón entre la resistencia de cada tap y la total, puede ser usada para determinar la razón de transformación cuando se conecta del modo indicado en la Figura 28.

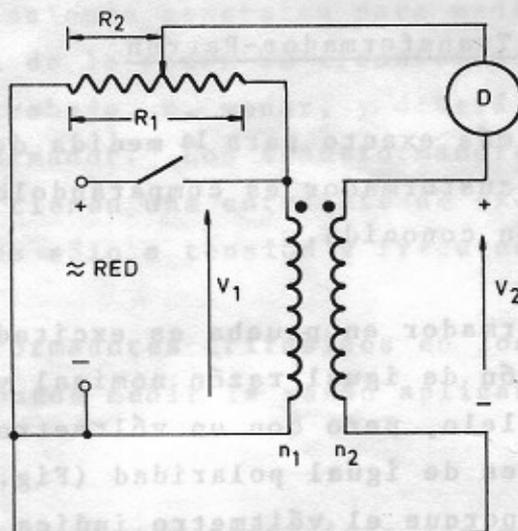


Figura 28: Método Potenciométrico

El cursor se mueve a lo largo de la resistencia potenciométrica hasta que el detector D (un voltmetro, o un ampermetro) marque cero. Entonces la razón de resistencias R_1/R_2 será igual a la razón de transformación del transformador, es decir:

$$\frac{n_1}{n_2} = \frac{R_1}{R_2} \tag{1}$$

5.- PROPIEDADES DE LAS CONEXIONES TRIFASICAS MAS IMPORTANTES

5.1.- Conexión Estrella-Estrella (Y-y)

5.1.1.- Tensiones y corrientes

Para altas tensiones la conexión en estrella es siempre preferible desde el punto de vista económico, sobre todo si la capacidad del transformador no es muy elevada.

La tensión aplicada a cada enrollado es menor que la tensión entre fases de la línea, la corriente por cada enrollado es igual a la corriente de línea (Figura 29).

En comparación con la conexión Δ para igual servicio, a la conexión Y le corresponde una tensión más baja por devanado y por consiguiente una corriente más elevada. Esto involucra menor

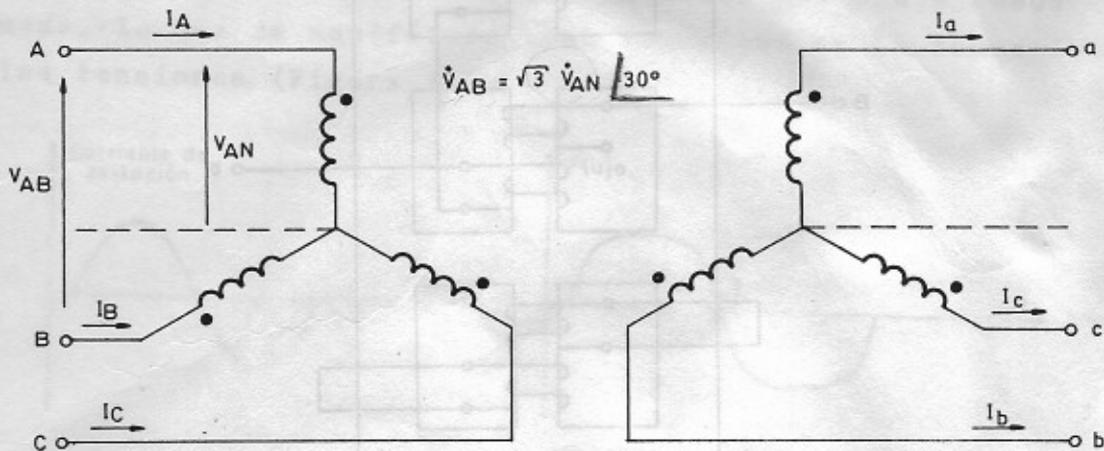


Figura 29: Conexión Yy.

aislamiento y el empleo de secciones de conductor (cobre) mayores, que dan rigidez a las bobinas y las protege mejor contra los enormes esfuerzos mecánicos que se producen durante cortocircuitos. También al requerir mayores secciones de alambre, aumenta la capacidad electrostática entre espiras y las sobretensiones transitorias quedan mejor distribuidas a lo largo del enrollado.

El montaje en estrella permite, además, tener el neutro accesible para la alimentación de las redes de baja tensión en servicios mixtos de luz y fuerza y, para la protección, por medio de la puesta a tierra en el lado de alta.

La inutilización de un devanado impide el funcionamiento total del sistema trifásico, quedando reducido a un sistema monofásico cuya tensión es la compuesta y cuya corriente permisible es la de una fase, reduciéndose la capacidad a un 58%.

Si se trata de tres transformadores monofásicos debe desconectarse íntegramente de la línea el transformador averiado; en su defecto, si se trata de uno trifásico, el devanado defectuoso debe aislarse, separando de la red el otro enrollamiento correspondiente de la misma fase y poniéndolo en cortocircuito para anular el flujo de dispersión que tiende a pasar por el núcleo. (Figura 30).

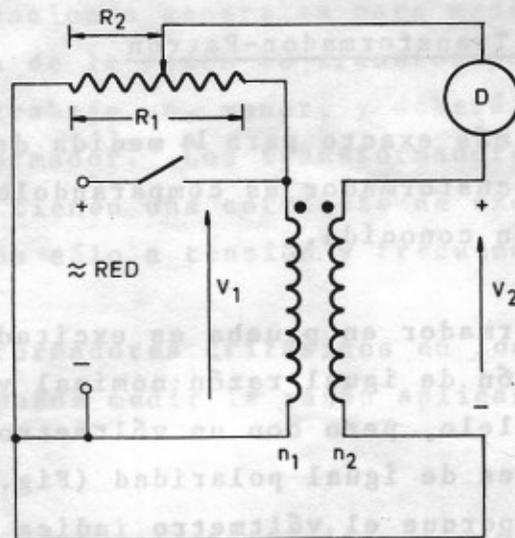


Figura 28: Método Potenciométrico

El cursor se mueve a lo largo de la resistencia potenciométrica hasta que el detector D (un vóltmetro, o un ampérmetro) marque cero. Entonces la razón de resistencias R_1/R_2 será igual a la razón de transformación del transformador, es decir:

$$\frac{n_1}{n_2} = \frac{R_1}{R_2} \quad (1)$$

5.- PROPIEDADES DE LAS CONEXIONES TRIFASICAS MAS IMPORTANTES

5.1.- Conexión Estrella-Estrella (Y-y)

5.1.1.- Tensiones y corrientes

Para altas tensiones la conexión en estrella es siempre preferible desde el punto de vista económico, sobre todo si la capacidad del transformador no es muy elevada.

La tensión aplicada a cada enrollado es menor que la tensión entre fases de la línea, la corriente por cada enrollado es igual a la corriente de línea (Figura 29).

En comparación con la conexión Δ para igual servicio, a la conexión Y le corresponde una tensión más baja por devanado y por consiguiente una corriente más elevada. Esto involucra menor

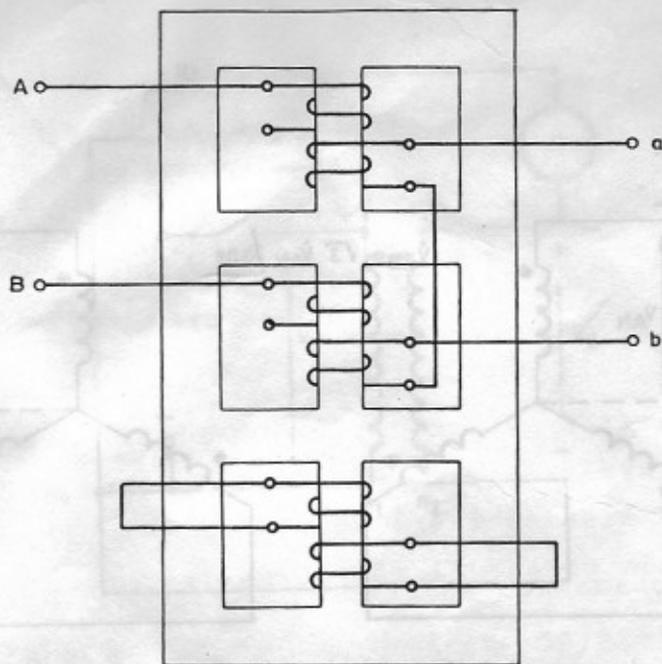


Figura 30: Transformador trifásico con una de sus fases dañada, aislado de la red y en cortocircuito.

5.1.2.- Desequilibrios en la carga

Debido al corrimiento del neutro, (tensiones fase-neutro desequilibradas) no debe usarse la conexión YY con cargas fase-neutro desequilibradas. En transformadores trifásicos tipo columna se acepta un desequilibrio de hasta un 10%. En cambio, en transformadores monofásicos conectados en YY, es muy inconveniente conectar cargas desequilibradas.

5.1.3.- Armónicas de corriente, tensión y flujo en la conexión Yy.

Si el transformador trifásico es del tipo acorazado o si está constituido por unidades monofásicas, al conectar el neutro primario a tierra, la corriente de tercera armónica (necesaria para crear un flujo sinusoidal) circula libremente por cada enrollado de la estrella y retorna por el neutro. La tensión secundaria es sinusoidal, pero las corrientes armónicas que circulan por la línea que alimenta al primario producen fuertes interferencias inductivas sobre las líneas telefónicas inmediatas. Si el neutro del lado de B.T también se conecta a tierra, la tercera armónica de magnetización puede circular por esos conductores y el efecto es análogo al anterior.

Cuando los neutros del primario y del secundario están

aislados de tierra, las terceras armónicas de corriente (que están en fase) no pueden circular por los enrollados por faltarles el conductor de retorno. La forma de onda del flujo resulta aplanada, lo que se manifiesta como armónicas en la forma de onda de las tensiones (Figura 31).

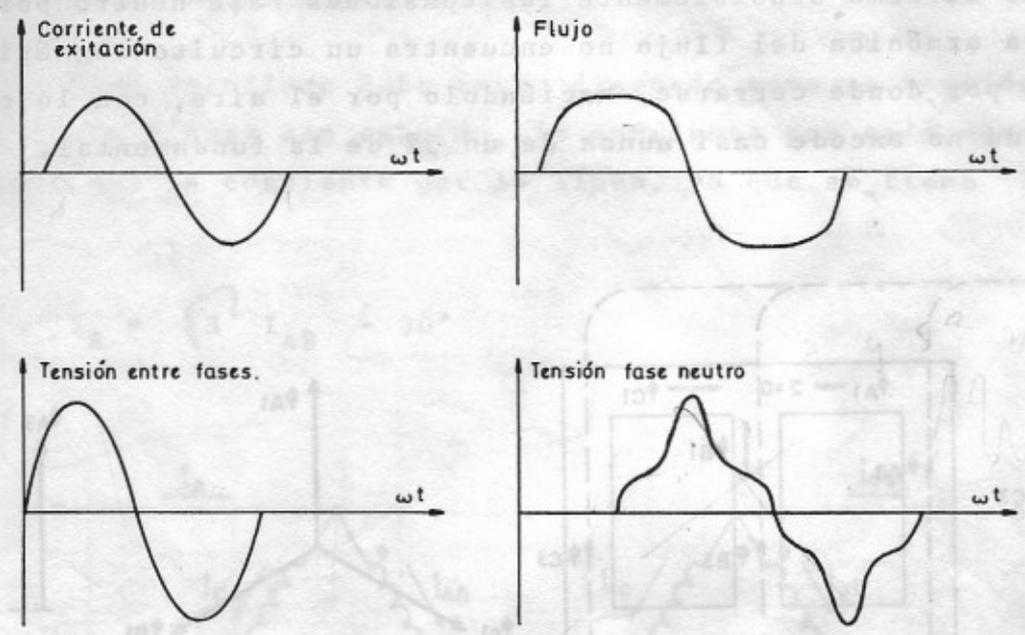


Figura 31: Formas de onda para la conexión YY sin neutro.

La forma de onda aplanada del flujo se debe a la presencia en ella de una tercera armónica. Estas armónicas de flujo (en fase) encuentran en estas disposiciones de núcleos, circuitos para establecerse sin atenuación, produciendo una armónica de tensión, que provoca una sobretensión fase-neutro solamente. Esta sobretensión puede ser muy intensa, poniendo en peligro la aislación de las bobinas. Por esto, los bancos de transformadores monofásicos o los transformadores trifásicos acorazados con neutros levantados de tierra deben diseñarse para una densidad de flujo que aleje la posibilidad de saturación del hierro.

La tercera armónica de tensión solamente aparece entre fase y neutro y puede alcanzar valores del 30 al 50% de la componente fundamental. Las tensiones entre fases no presentan componentes de tercera armónica porque, al componerse en el circuito de los enrollados, lo hacen en sentido opuesto (restándose) obteniéndose una resultante nula.

5.1.4.- Transformadores con "neutro magnético"

En los transformadores trifásicos tipo núcleo o columna (Figura 32) la falta de neutro primario, aunque impide circular a la componente de tercera armónica de la corriente de magnetización no deforma sensiblemente las tensiones fase-neutro porque la tercera armónica del flujo no encuentra un circuito magnético permeable por donde cerrarse, haciéndolo por el aire, con lo cual su magnitud no excede casi nunca de un 5% de la fundamental.

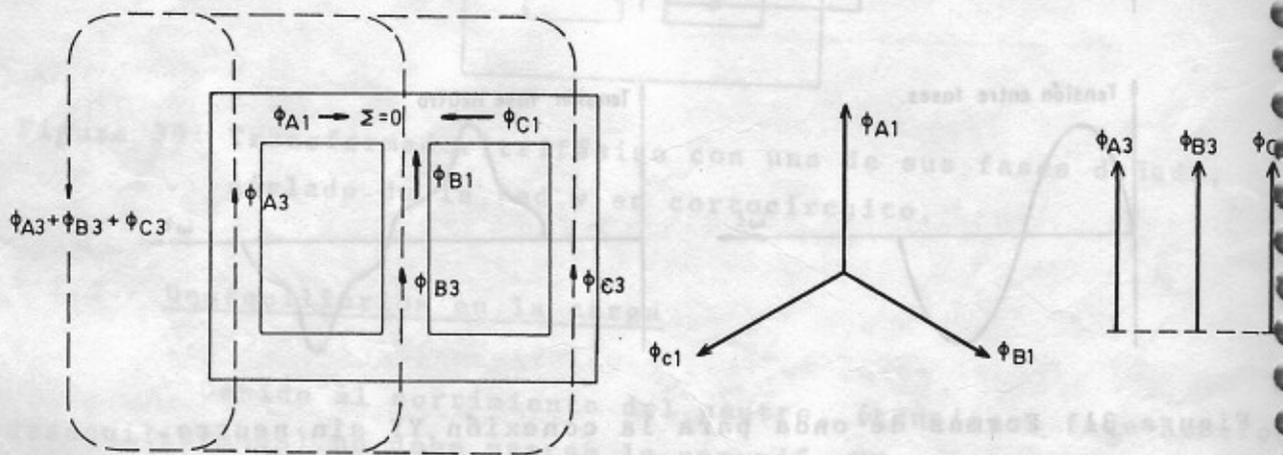


Figura 32: Transformador trifásico tipo núcleo (o columna).

La falta de neutro primario evita interferencias inducidas e incluso la falta de neutro secundario no aumenta las tensiones entre bobinas y núcleos, con lo cual la aislación puede hacerse en forma normal.

El desequilibrio de cargas con neutro secundario y ausencia de él en el primario, tampoco altera tan profundamente como en el caso anterior el equilibrio de tensiones, ya que el flujo creado por las intensidades primarias en las fases no cargadas queda compensado por el propio de la carga secundaria, cuyo circuito magnético de retorno debe cerrarse necesariamente a lo largo de los núcleos respectivos de las otras dos fases. No se recomienda, sin embargo, que el desequilibrio exceda de un 10% de la corriente de plena carga.

Esta disposición (núcleo tipo columna) presenta, pues, todas las ventajas de la conexión en estrella, sin que se hagan ma-

nifuestas en forma apreciable sus desventajas.

5.2.- Conexión Delta-Delta (Dd)

5.2.1.- Tensiones y corrientes

Cada enrollado debe estar diseñado para la tensión entre fases de la línea; sin embargo, la corriente por cada enrollado es menor que la corriente por la línea, ya que se tiene (Figura 33).

$$I_A = \sqrt{3} I_{AB} - 30^\circ$$

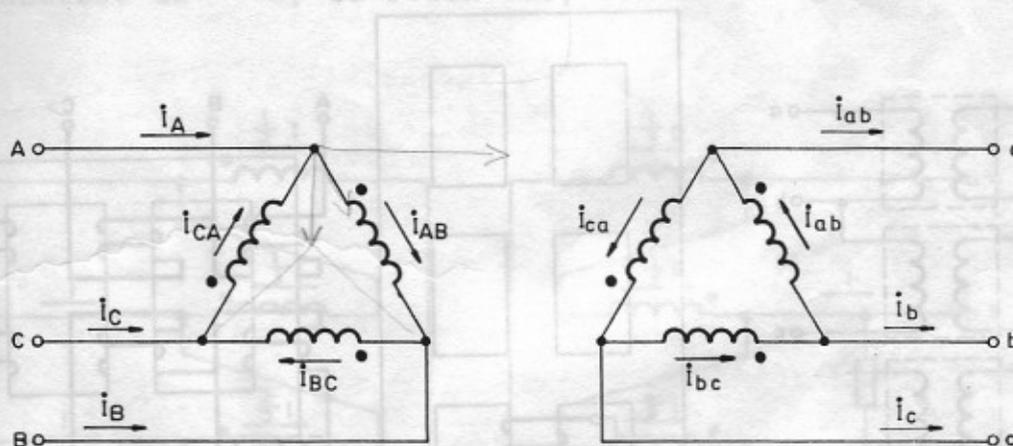


Figura 33: Corrientes y tensiones en la conexión D-d.

Al ser la corriente por los devanados menor, la sección de los conductores se puede disminuir en $1/\sqrt{3}$, con respecto a la conexión Y para igual densidad de corriente.

La conexión Δ -d, por carecer de neutro, no permite la alimentación monofásica a cargas secundarias, o a redes mixtas de luz y fuerza de cuatro líneas. Tampoco es posible la protección de puesta a tierra. Todo esto limita sus posibilidades de aplicación.

Esta conexión es conveniente sólo para pequeñas potencias, con corrientes de línea fuertes y tensiones bajas.

Si falla un enrollado (una de las unidades monofásicas en el caso de un banco) la red trifásica puede seguir alimentándose, pero con una potencia menor, con la misma tensión entre fases li-

5.1.4.- Transformadores con "neutro magnético"

En los transformadores trifásicos tipo núcleo o columna (Figura 32) la falta de neutro primario, aunque impide circular a la componente de tercera armónica de la corriente de magnetización no deforma sensiblemente las tensiones fase-neutro porque la tercera armónica del flujo no encuentra un circuito magnético permeable por donde cerrarse, haciéndolo por el aire, con lo cual su magnitud no excede casi nunca de un 5% de la fundamental.

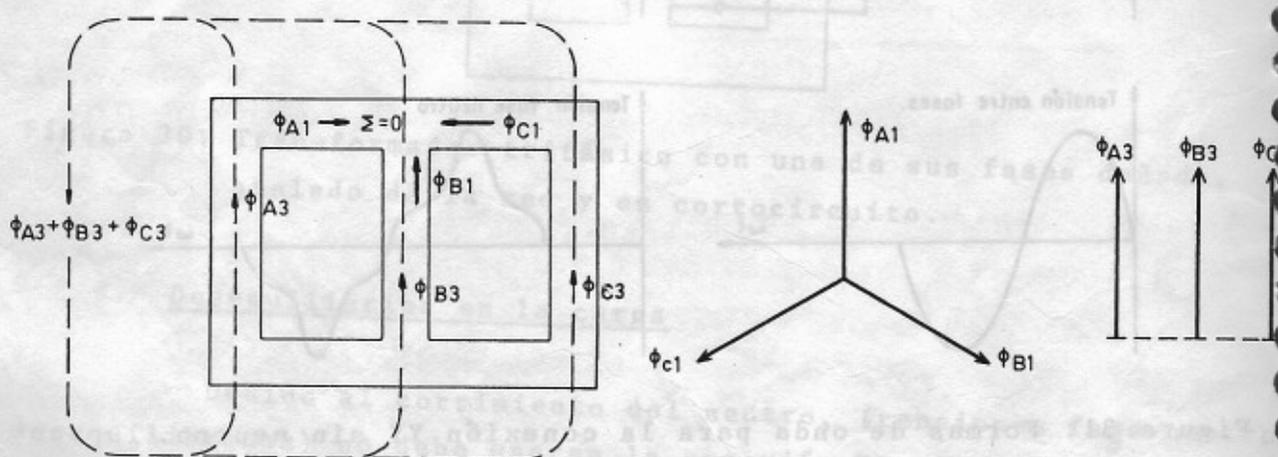


Figura 32: Transformador trifásico tipo núcleo (o columna).

La falta de neutro primario evita interferencias inductivas e incluso la falta de neutro secundario no aumenta las tensiones entre bobinas y núcleos, con lo cual la aislación puede hacerse en forma normal.

El desequilibrio de cargas con neutro secundario y ausencia de él en el primario, tampoco altera tan profundamente como en el caso anterior el equilibrio de tensiones, ya que el flujo creado por las intensidades primarias en las fases no cargadas queda compensado por el propio de la carga secundaria, cuyo circuito magnético de retorno debe cerrarse necesariamente a lo largo de los núcleos respectivos de las otras dos fases. No se recomienda, sin embargo, que el desequilibrio exceda de un 10% de la corriente de plena carga.

Esta disposición (núcleo tipo columna) presenta, pues, todas las ventajas de la conexión en estrella, sin que se hagan ma-

mitando la corriente de línea al valor de la corriente que permite cada enrollado (A esta configuración se le denomina conexión en V o delta abierta). La potencia se reduce al 58%.

Si la instalación se compone de transformadores monofásicos, la unidad averiada se desconectará simplemente de la línea, Figura 34.

Si el circuito magnético es de tipo acorazado, se desconectan los dos devanados de la fase defectuosa y se pondrá el enrollamiento serie de estos dos en cortocircuito para limitar el flujo de dispersión por el núcleo correspondiente.

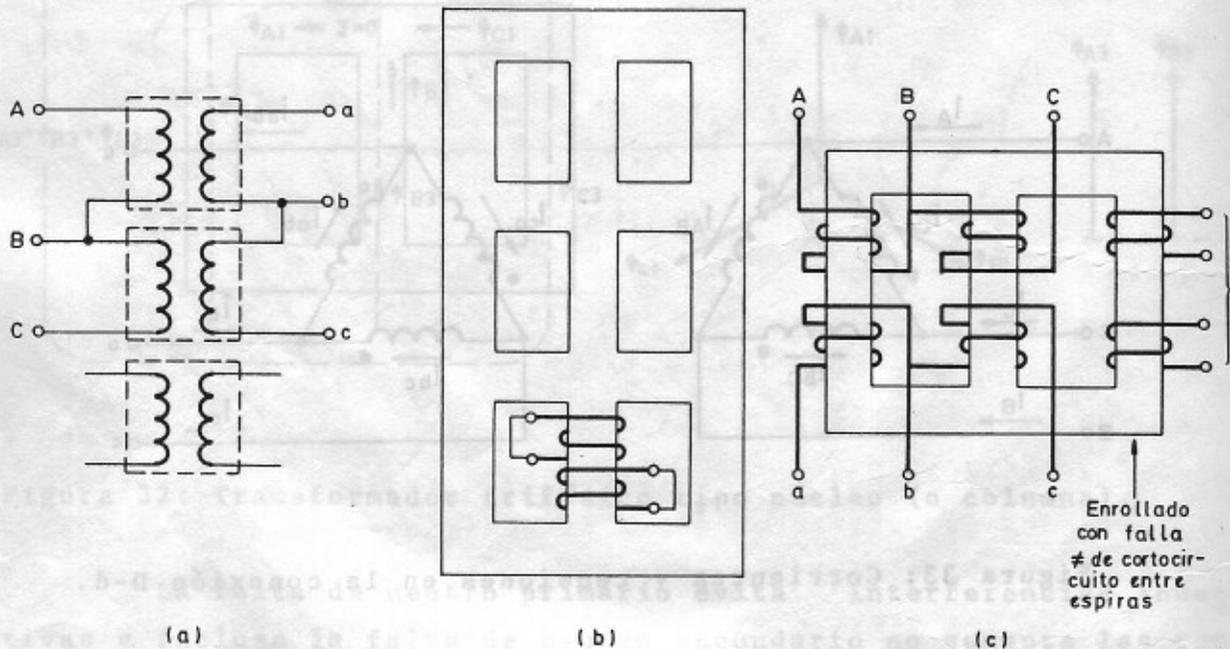


Figura 34: Conexión D-d con falla en la fase c.

En el transformador de tipo "núcleo" (o columna) los flujos de las otras dos fases continúan desfasados entre sí como ordinariamente, cerrándose parcialmente el circuito magnético normal por la tercera columna. Por lo tanto, sus devanados deberán mantenerse con los extremos aislados ya que ellos aún poseen tensiones inducidas.

Cuando la avería fuese por cortocircuito entre espiras, el transformador tipo columna íntegro debe ser eliminado de servicio.

5.2.2.- Desequilibrios en la carga

En cuanto al trabajo con cargas desequilibradas y cualquier que sea también el tipo de núcleo, la corriente producida por una carga monofásica entre fases del enrollado secundario provoca corrientes primarias distribuidas igualmente por los enrollados y, por consiguiente, no se produce en las fases sobreexcitación alguna, limitándose el desequilibrio de tensiones al que proviene de las caídas en las respectivas impedancias.

En la Figura 35 se indica, de modo aproximado, el reparto de la corriente en las tres fases, para una transformación trifásica, conectada en D-d, de razón 1:1, con una carga monofásica.

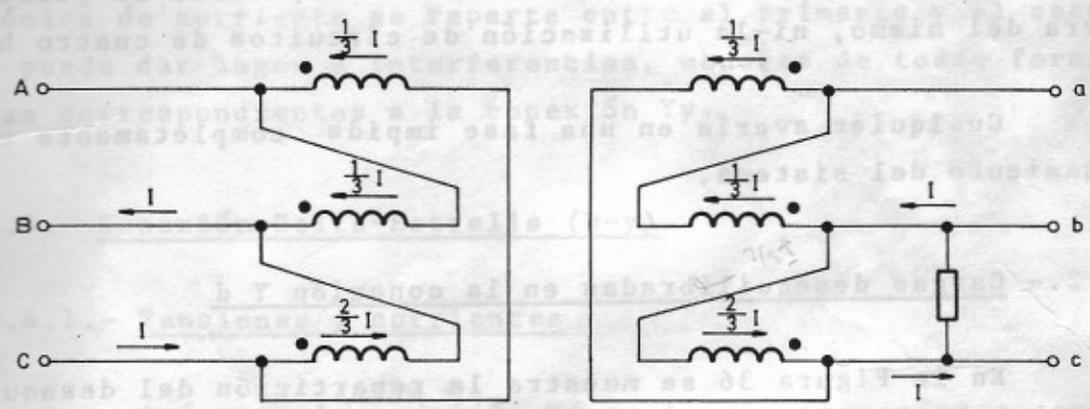


Figura 35: Conexión D-d con una carga monofásica

Cuando los transformadores son monofásicos, conviene que sus impedancias de cortocircuito sean idénticas para evitar el desequilibrio en el reparto de cargas desequilibradas.

5.3.2.- Armónicas de corriente, tensión y flujo en la conexión Δ-d.

Independiente de la estructura del circuito magnético, esta conexión permite la circulación local de las terceras armónicas de corriente (dentro de las deltas primarias y secundarias), sin dar lugar a perturbaciones inductivas transmitidas por las líneas.

Al poder circular corrientes de tercera armónica (y sus

múltiples impares), la tensión (y el flujo) están libres de ellas obteniéndose tensiones sinusoidales, libres de sobretensiones debidas a armónicas.

5.3.- Conexión Estrella-Delta (Y d)

5.3.1.- Tensiones y corrientes

En esta conexión, con la estrella en el lado de A.T, las tensiones por devanado son las más favorables, por lo que se usa preferentemente para la reducción de tensión en las redes de transmisión y distribución de energía que no precisan neutro secundario.

La carencia de neutro secundario no permite la puesta a tierra del mismo, ni la utilización de circuitos de cuatro hilos.

Cualquier avería en una fase impide completamente el funcionamiento del sistema.

5.3.2.- Cargas desequilibradas en la conexión Y d

En la Figura 36 se muestra la repartición del desequilibrio producido por una carga monofásica en el secundario (d), para transformadores de relación 1:√3 (relación de transformación 1:1 para las tensiones por fase).

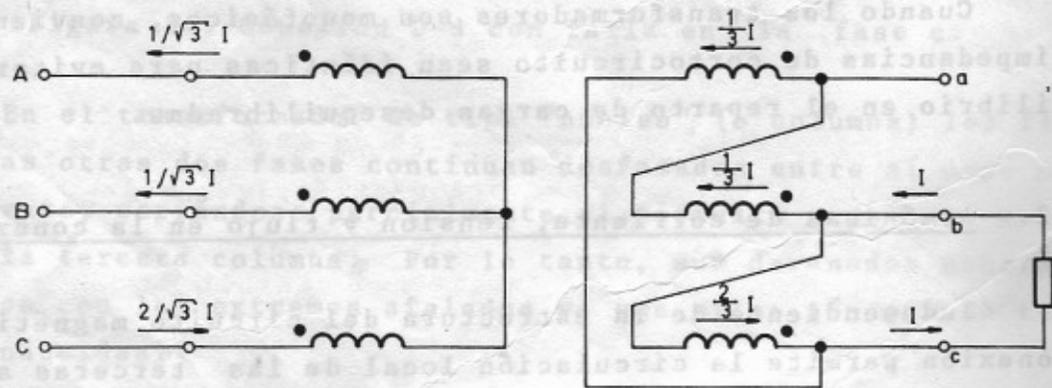


Figura 36: Repartición de corrientes en la conexión Yd con una carga monofásica.

Cualquiera sea la clase de circuito magnético empleado, el desequilibrio de cargas secundarias se transmite al primario en forma compensada para cada fase, sin producir sobreexcitación en ninguna de ellas.

5.3.3.- Armónicas de corriente, tensión y flujo en la conexión Y-d

La tercera armónica de la corriente de magnetización circula sin dificultad por los enrollados secundarios (sin salir a la línea) y no se producen sobretensiones por falta de excitación, ni interferencias sobre las líneas telefónicas.

El primario puede ponerse a tierra como protección, pero, si en la central se ha tomado también esta medida, la tercera armónica de corriente se reparte entre el primario y el secundario y puede dar lugar a interferencias, menores de todas formas que las correspondientes a la conexión Yy.

5.4.- Conexión Delta-Estrella (D-y)

5.4.1.- Tensiones y corrientes

Así como la conexión Yd es la más conveniente como reductora de tensión, esta es la transformación elevadora más práctica desde el punto de vista de la tensión por enrollado.

Aunque esta conexión es ampliamente usada como elevadora de tensión, es bastante usada también en distribución, como reductora, por la posibilidad de alimentar una red de cuatro conductores en baja tensión (manteniendo la D en el otro lado como compensadora de armónicas y cargas desequilibradas).

Por otra parte, la falla de un sólo devanado deja inutilizado el sistema completo.

5.4.2.- Cargas desequilibradas en la conexión Dy

El desequilibrio de las cargas secundarias se neutraliza por la acción de la Delta primaria en las tres fases sin dar lugar a sobreexcitación por corriente no compensada en ninguna de ellas.

En las Figuras 37 a) y b) se muestran la repartición de corrientes para cargas monofásicas secundarias entre fases, y entre fase neutro.

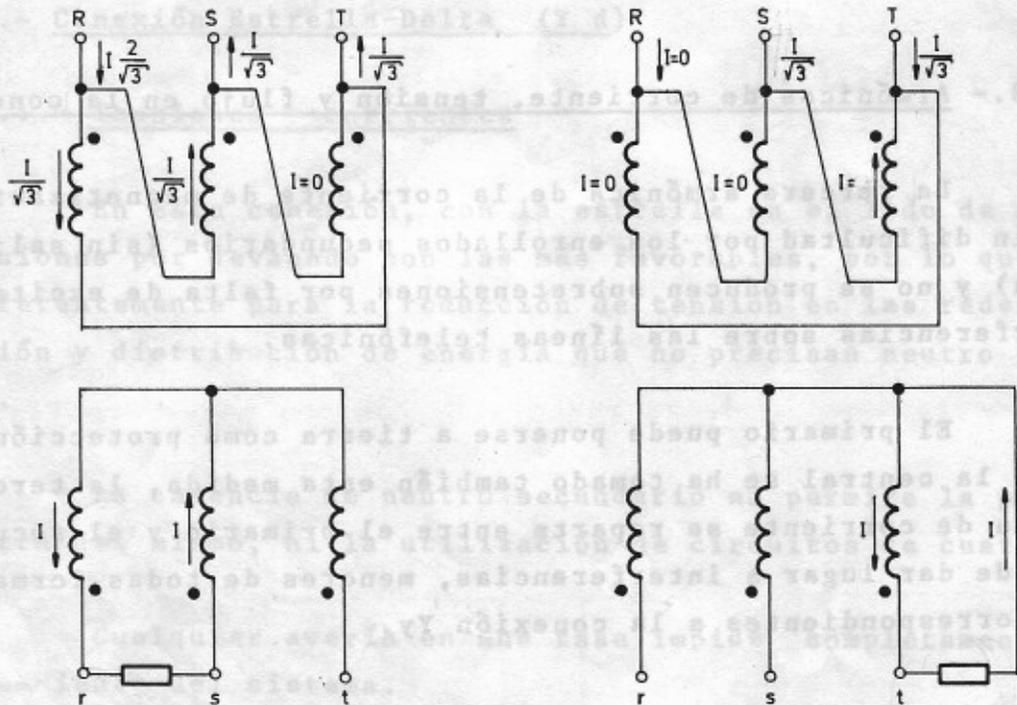


Figura 37: Repartición de corrientes en la conexión Dy con cargas monofásicas. La relación de transformación es $V_{RS}/V_{rs} = 1$.

5.4.3.- Armónicas en la conexión Dy

La tercera armónica de la corriente de magnetización se establece en la delta primaria sin afectar a la red secundaria si ésta no cierra su retorno por el neutro.

En redes de transmisión, en líneas de gran longitud, el efecto de la capacidad entre fases y tierra, puede constituir un circuito de muy baja impedancia para la circulación de terceras armónicas de corriente, lo que puede provocar perturbaciones apreciables en este sentido; este circuito queda de todos modos siempre atenuado por el circuito cerrado por la Delta.

5.5.- Conexión Estrella - Zig Zag (Y-z)

5.1.1.- Tensiones y corrientes

Se ha visto que la conexión Yz presenta un grave inconveniente cuando existe desequilibrio de cargas en el secundario, lo que se manifiesta como sobretensiones en el lado de AT. Para evitar esto se puede utilizar la conexión Zig-Zag en el secundario, como se muestra en la Figura 38. En la práctica solamente se emplea el lado de B.T. para la z.

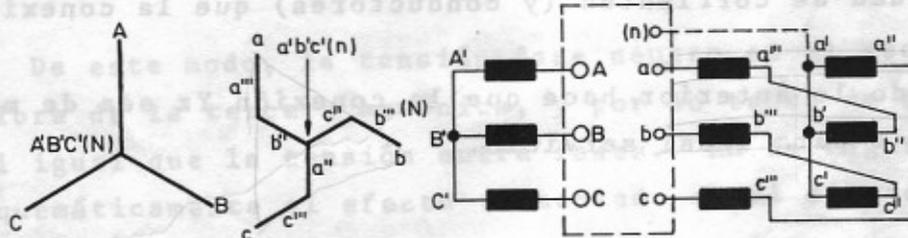


Figura 38: Conexión Yz, y su diagrama fasor.

Para formar la conexión z se debe subdividir el secundario en dos partes iguales, conectando como neutro los bornes de polaridad como se muestra en la figura; luego conectar en serie, a cada rama de la estrella, las bobinas invertidas, de las fases adyacentes según un determinado orden cíclico.

En la Figura 39 se ha dibujado, para mayor claridad, sólo una parte del diagrama fasor suficiente para obtener la relación entre las tensiones primarias y secundarias a partir de la razón de espiras del primario (N_1) y del total del secundario (N_2).

De la Figura 39 se encuentra que la razón de transformación de las tensiones es $1.15 N_1/N_2$ ($2/\sqrt{3} N_1/N_2$) y por lo tanto mayor que si las unidades se hubiesen conectado en Yy (N_1/N_2 en este caso). Este aumento de la razón es provocado por la disminución de la tensión en el secundario; esto hace que la potencia traspasada al secundario deba reducirse en la misma proporción,

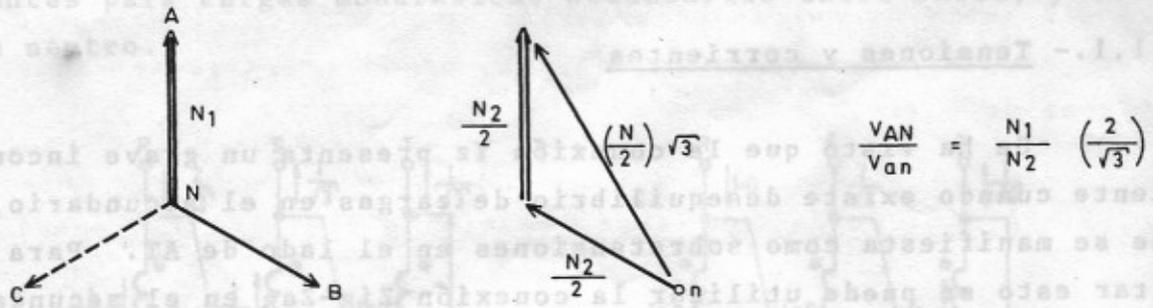


Figura 39: Relación entre las tensiones en la conexión Yz.

para igualdad de corrientes (y conductores) que la conexión Y.

Todo lo anterior hace que la conexión Yz sea de mayor costo que una Y para igual servicio.

5.5.2.- Cargas desequilibradas

Esta conexión hace que la corriente que circula por cada fase cargada del secundario, afecte siempre por igual y a la vez a dos fases del primario. De este modo siempre, para cargas desequilibradas, hay corrientes por el primario que producen F.M.M. que se neutralizan con las del secundario, no produciendo desequilibrios en las tensiones.

En la Figura 40 se muestran la repartición de corrientes por la conexión Yz para cargas monofásicas en el secundario, entre fases y entre fase-neutro.

5.5.3.- Armónicas de corriente, tensión y flujo en la conexión Yz.

a) Conexión Yz sin neutro primario. En este caso, al no existir corrientes de excitación de tercera armónica, existirán terceras armónicas de flujo en cada fase, lo que provoca tensiones armónicas del mismo orden en el secundario. Sin embargo:

- i) cada segmento del secundario se conecta con otro en oposición.
- ii) las tensiones de tercera armónica están todas en fase (son similares a la secuencia cero).

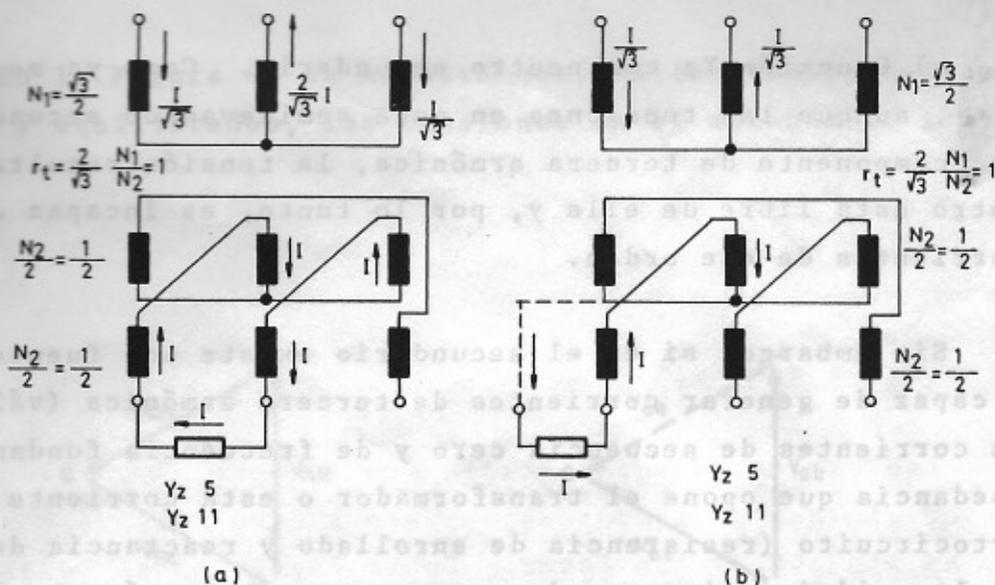


Figura 40: Cargas desequilibradas en la conexión Yz.

De este modo, la tensión fase neutro en el secundario (z) está libre de la tercera armónica, y por lo tanto de sobretensiones, al igual que la tensión entre fases. En la Figura 41 se muestra esquemáticamente el efecto (aumentado en el dibujo) de sumar

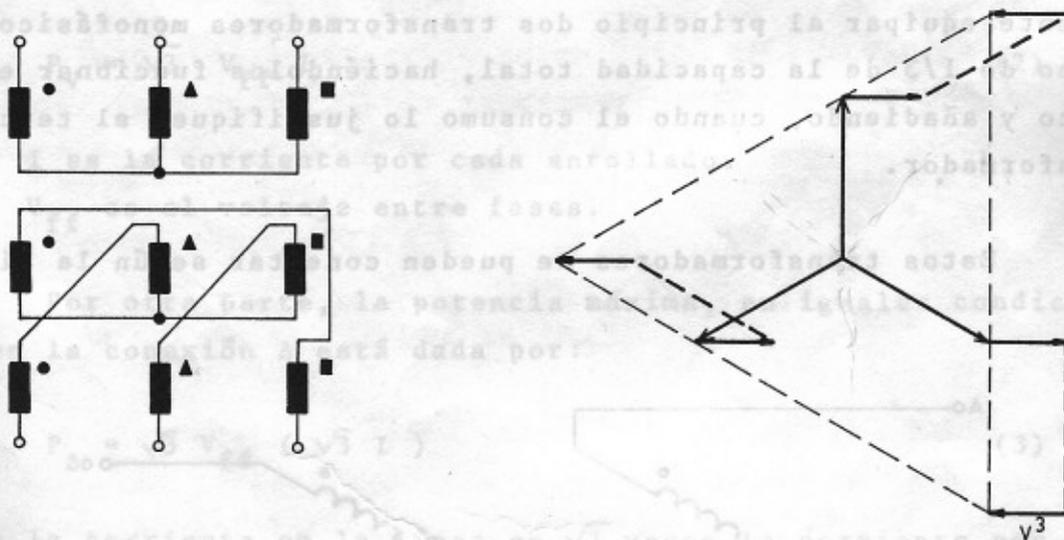


Figura 41: Esquema (no es diagrama fasor ya que hay tensiones de dos frecuencias) de las tensiones en el secundario en z. V^3 es la tensión de 3^{ra} armónica.

tensiones en fase a cada uno de los segmentos de enrollado del secundario.

b) Conexión Yz con neutro primario. En este caso puede circular corriente de excitación con 3a armónica con los efectos ya estudiados.

c) Conexión Yz con neutro secundario. Como ya se ha visto en a), aunque las tensiones en cada semidevanado secundario po sea una componente de tercera armónica, la tensión resultante fase-neutro está libre de ella y, por lo tanto, es incapaz de producir corrientes de ese orden.

Sin embargo, si en el secundario existe una fuente o circuito capaz de generar corrientes de tercera armónica (válido para las corrientes de secuencia cero y de frecuencia fundamental), la impedancia que opone el transformador o esta corriente es la de cortocircuito (resistencia de enrollado y reactancia de fuga), ya que la unidad es incapaz de generar una contra f.e.m. fase neutro de esas características.

5.6.- Conexión en Delta abierta, o conexión en V.

5.6.1.- Tensiones y corrientes

En algunos casos, por razones económicas, en instalaciones pequeñas susceptibles de ampliaciones futuras, puede ser conveniente equipar al principio dos transformadores monofásicos, cada uno de 1/3 de la capacidad total, haciéndolos funcionar en trifásico y añadiendo, cuando el consumo lo justifique, el tercer transformador.

Estos transformadores se pueden conectar según la Figura 42.

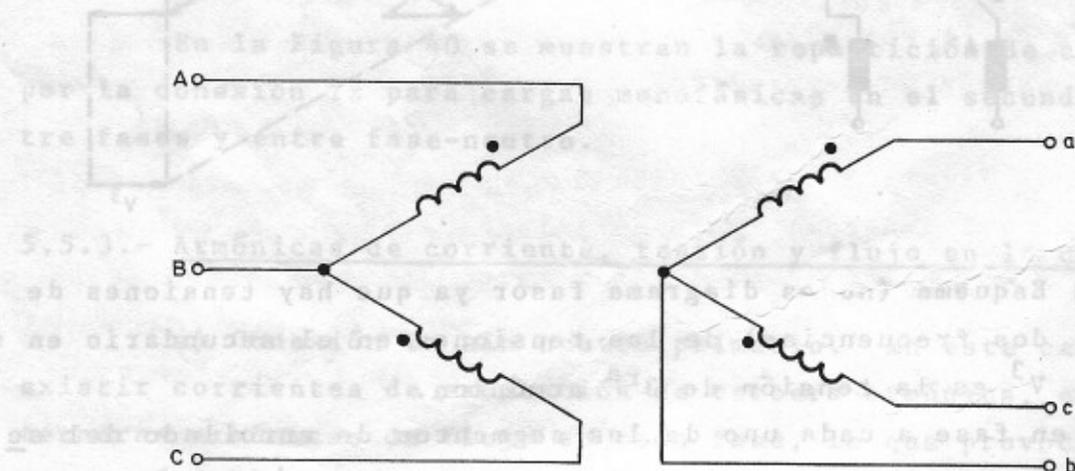


Figura 42: Conexión en V.

En la Figura 43 se muestra que, si las tensiones son simétricas y equilibradas, las tensiones en el secundario también lo son.

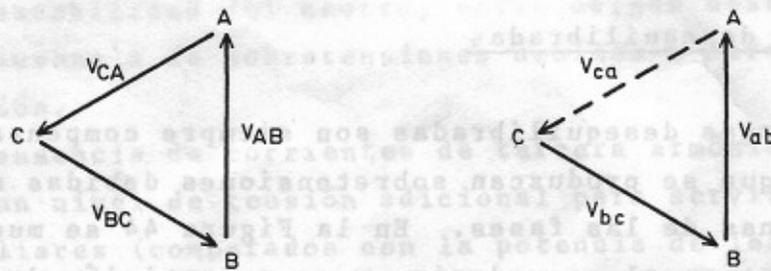


Figura 43: Diagrama fasor de las tensiones en la conexión V.

Así, si tanto la alimentación como la carga son simétricas y equilibradas, la potencia activa será:

$$P_V = \sqrt{3} V_{ff} I \tag{2}$$

donde: I es la corriente por cada enrollado.

V_{ff} es el voltaje entre fases.

Por otra parte, la potencia máxima, en iguales condiciones, en la conexión Δ está dada por:

$$P_{\Delta} = \sqrt{3} V_{ff} (\sqrt{3} I) \tag{3}$$

ya que la corriente en la línea es $\sqrt{3}$ veces la corriente por los enrollados.

De lo anterior se tiene que:

$$P_V = \frac{1}{\sqrt{3}} P_{\Delta} \tag{4}$$

$$P_V = 0,58 P_{\Delta}$$

y no $P_{\Delta} = \frac{2}{3} P_{\Delta}$ como pudiera esperarse.

NOTA: No se emplean conexiones V en paralelo (con otras V), porque resulta más sencillo y económico completar la delta en una de ellas.

5.6.2.- Cargas desequilibradas

Las cargas desequilibradas son siempre compensadas en el primario, sin que se produzcan sobretensiones debidas a sobreexcitación en algunas de las fases. En la Figura 44 se muestra una carga monofásica en el secundario, y su repartición de corrientes.

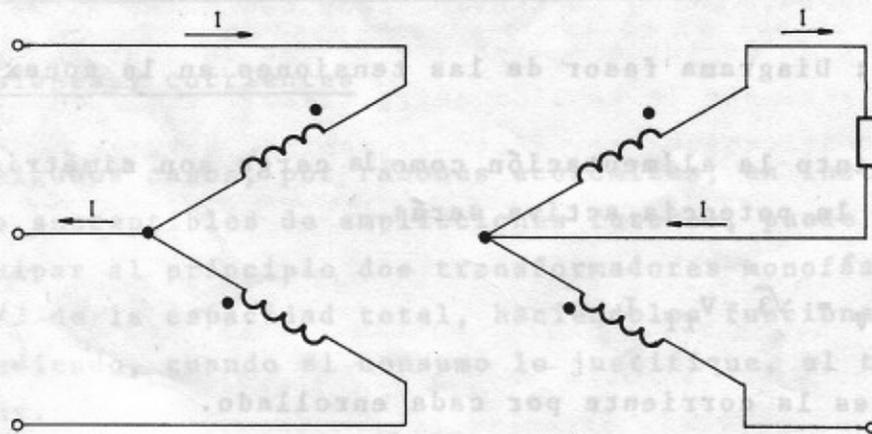


Figura 44: Carga monofásica en conexión V, razón 1:1.

5.6.3.- Armónicas en la conexión V.

Las componentes de tercera armónica, en la corriente de excitación, necesarias para crear el flujo sinusoidal, circulan por los devanados primarios y secundarios y, como están en fase, se suman en el conductor conectado al punto medio. No existen entonces sobretensiones, pero el efecto inductivo sobre las líneas de comunicación cercanas se hace sentir, aunque menos intensamente que cuando se usa la conexión Yy con neutros.

5.7.- Conexión estrella-estrella con terciario en delta (Yy d)

En sistemas de alta tensión tanto en el primario como en el secundario, son necesarios una o más de las siguientes condiciones:

- neutro accesible para protección y/o cargas.
- estabilidad del neutro, entre cargas desequilibradas.
- ausencia de sobretensiones debidas a terceras armónicas en la tensión.
- ausencia de corrientes de tercera armónica en las líneas.
- un nivel de tensión adicional para servir consumos pequeños o auxiliares (comparados con la potencia de los devanados principales).

Para ello, es posible usar ventajosamente transformadores de tres enrollados, conectados cada uno de ellos de modo trifásico. Normalmente los enrollados conectados en Y son ambos de A.T. (por ejemplo 220/110 kV), y el conectado en Δ de menor tensión, y de menor potencia (con conductores de menor sección que la correspondiente a la de un enrollado de potencia).

Ejemplo de lo anterior es un banco de transformadores monofásicos, cada uno con tres devanados, formando una conexión como la que se especifica a continuación:

Yy0d5, 220/110/13,2 kV
 100 MVA en Yy, 10 MVA en Yd.

En general, la delta proporciona un camino para la circulación de la tercera armónica de la corriente de excitación y, además, opera como estabilizadora de las cargas desequilibradas.

En la Figura 45 se muestra la repartición de corrientes en la conexión Yyd para una carga secundaria monofásica.

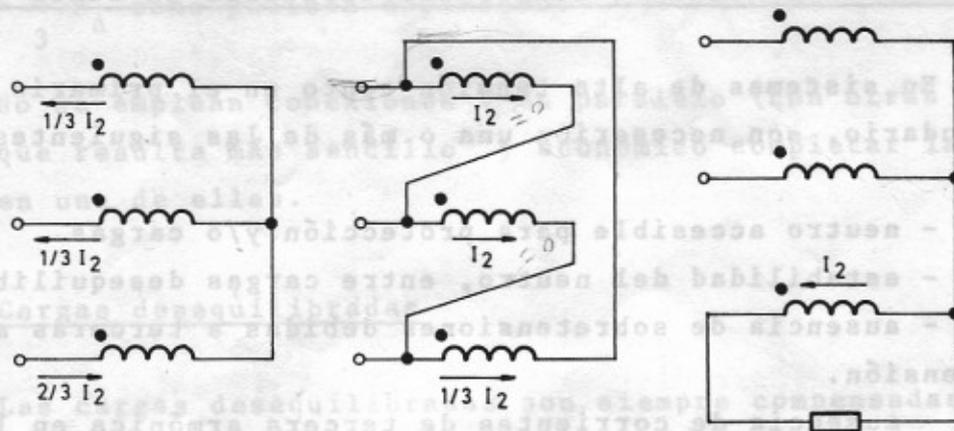


Figura 45: Carga ,monofásica en la conexión Yyd. Transformadores de razón 1:1.

5.8.- Resumen de las características más destacadas de las conexiones trifásicas en transformadores.

Con el fin de establecer comparaciones entre las distintas conexiones trifásicas de transformadores se puede, como primera aproximación, considerar cada lado (A.T o B.T) de modo independiente. Luego de lo anterior, se deben considerar la interacción de todos los lados del transformador (primario, secundario, terciario, etc.), y también los efectos especiales derivados de la configuración del circuito magnético (banco de transformadores monofásicos, transformadores trifásicos, tipo acorazado o columna).

En el cuadro de la Figura 46 se resumen algunas de las principales características de las conexiones Y, Δ y Z, consideradas independientemente, para enrollados de igual tensión y potencia.

	Y	Δ	Z
1.- Tensión fase-fase	V	V	V
2.- Tensión por devanado	$V/\sqrt{3}$	V	$\frac{V}{\sqrt{3}}$ y $\frac{V}{2\sqrt{3}}$ *
3.- Corriente de línea	I	I	I
4.- Corriente por devanado	I	$I/\sqrt{3}$	I
5.- Sección del conductor con $A/\text{mm}^2 = \text{constante}$.	S	$\frac{S}{\sqrt{3}}$	S
6.- Número de espiras	N	$\sqrt{3} N$	$\frac{2}{\sqrt{3}} N$
7.- Peso (y costo) del conductor	100	100	115,5
8.- 3ras. armónicas de corriente en la línea.	Y $\begin{array}{l} \text{SI} \\ \text{NO} \end{array}$	NO	NO
9.- Sobretensiones de 3ra. armónica en tensión fase-neutro.	Y $\begin{array}{l} \text{NO} \\ \text{SI} \end{array}$	NO	NO
10.- Uso de cargas desequilibradas	NO	SI	SI
11.- Observaciones	1.- recomendable para A.T. y cuando el neutro es necesario. 2.- conexión ΔY en distribución y en aplicaciones en industrias.	recomendable para B.T. y altas corrientes. Equilibra cargas, suprime armónicas en la corriente de línea y en la tensión.	más caro que Y, Δ , con ventajas de Δ y neutro.

*: tensión por semidevanado.

Figura 46: Cuadro resumen con características más importantes de conexiones Y, D, Z, consideradas aisladamente.

BIBLIOGRAFIA

- [1] E. Ras : "Transformadores de potencia, de medida y de protección", Marcombo, 1972.
- [2] Norma IEC (International Electrotechnical Commission), Publication 76, Second Edition, "Power Transformers", 1967.
- [3] Norma VDE (Normas Alemanas), VDE 0532/8.64 9.
- [4] J. Corrales: "Teoría, Cálculo y Construcción de Transformadores". Escuela del Técnico Electricista, Tomo VII, Editorial Labor, 1965.
- [5] M.I.T. (Massachusetts Institute of Technology): "Magnetic Circuits and Transformers", M.I.T. Press, 1965.
- [6] "Transformadores monofásicos de dos enrollados", Publicación N° 27, (C/4), Departamento de Ingeniería Eléctrica, U. de Chile, 1982.

Comisión Editora:

Rodolfo Palma Z.

Alfredo Muñoz R.

Jorge Romo L. (Encargado de Publicaciones)

/pvs.-

Septiembre, 1982