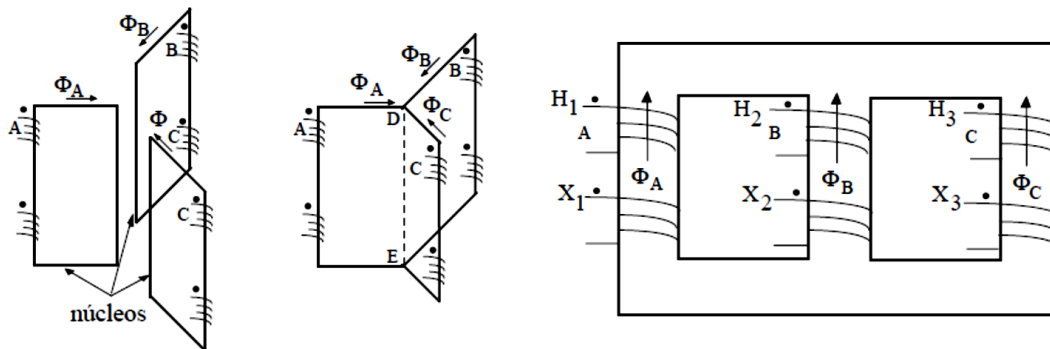


Transformadores Trifásicos en Régimen Equilibrado.

1. Transformador trifásico de tres columnas (Core Type)

Para adaptar niveles de tensión y corriente en un sistema trifásico es posible utilizar tres transformadores monofásicos adecuadamente conectados o utilizar transformadores que constructivamente son trifásicos; uno de los tipos, de transformadores trifásicos, más utilizados es llamado transformador de tres columnas.

El transformador trifásico de tres columnas se puede sintetizar a partir de tres transformadores monofásicos idénticos de la siguiente forma:



Si los transformadores se alimentan mediante una fuente trifásica perfecta y la carga es equilibrada entonces los flujos Φ_A, Φ_B, Φ_C tendrán el mismo módulo y estarán desfasados 120° entre sí, por lo tanto si se desprecian las fugas se cumple:

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

Como consecuencia de esta restricción se tiene que por columna central (DE en la figura) el flujo magnético es nulo; se concluye que es posible prescindir de esta columna sin alterar el funcionamiento del transformador, logrando así un ahorro de material frente a la alternativa de tres transformadores monofásicos.

Como se puede observar en la figura, el transformador trifásico de tres columnas presenta una fase primaria y una secundaria en cada columna del núcleo y en régimen equilibrado $\Phi_A + \Phi_B + \Phi_C = 0$ (a menos de las fugas que se desprecian en este análisis)

Observaciones:

- Alternativa de menor costo que la utilización de tres transformadores monofásicos; ahorro importante de hierro.
- La máquina que se obtiene no es del todo simétrica pues la longitud de hierro involucrada en la reluctancia de las fases laterales es mayor que la correspondiente a la fase central; esto se aprecia mayoritariamente en vacío mediante un desequilibrio de las corrientes:

Supongamos el transformador en vacío con el primario conectado en triángulo o en estrella sin conectar el neutro y alimentado por una fuente trifásica perfecta.

Entonces:

$$i_A + i_B + i_C = 0 \text{ (Si existe neutro en el primario esta sin conectar)}$$

$$\phi_A + \phi_B + \phi_C = 0 \text{ (Se desprecian los flujos de fuga)}$$

Si no se considera la resistencia de los bobinados primarios:

$$\overline{V}_A = j\omega\phi_A \quad \text{Flujo en la columna A}$$

$$\overline{V}_B = j\omega\phi_B \quad \text{Flujo en la columna B}$$

$$\overline{V}_C = j\omega\phi_C \quad \text{Flujo en la columna C}$$

Conocidas las tenciones se pueden determinar los flujos.

A partir del símil eléctrico del circuito magnético es posible plantear las siguientes ecuaciones entre flujo y fuerzas magneto motrices (Fmm):

\mathcal{R} Reluctancia de cada columna

\mathcal{R}' Mitad de la reluctancia de la culata horizontal del transformador

$$N(I_A - I_B) = \phi_A(\mathcal{R} + 2\mathcal{R}') - \phi_B\mathcal{R}$$

$$N(I_C - I_B) = \phi_C(\mathcal{R} + 2\mathcal{R}') - \phi_B\mathcal{R}$$

$$I_A + I_B + I_C = 0$$

Dado que se está en régimen sinusoidal estas ecuaciones están planteadas fasorialmente.

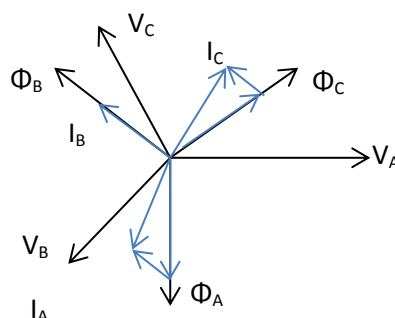
Resolviendo se obtiene:

$$NI_A = \phi_A(\mathcal{R} + 2\mathcal{R}') + \frac{2}{3}\phi_B\mathcal{R}'$$

$$NI_B = \frac{5}{3}\phi_B\mathcal{R}'$$

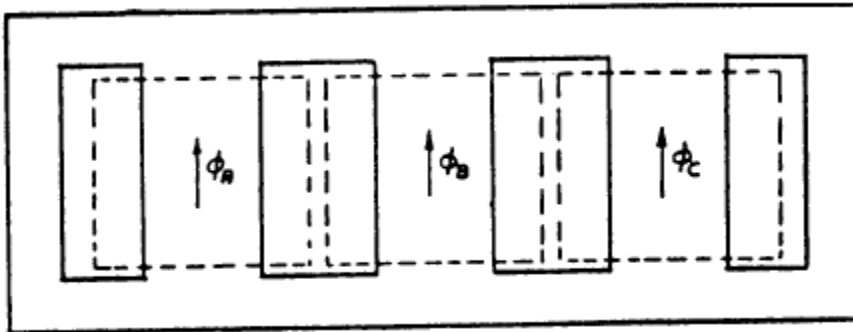
$$NI_C = \phi_C(\mathcal{R} + 2\mathcal{R}') + \frac{2}{3}\phi_B\mathcal{R}'$$

Esto demuestra la asimetría entre las corrientes de vacío de las tres fases.



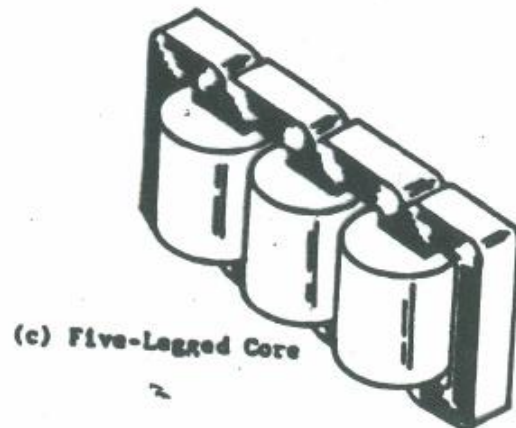
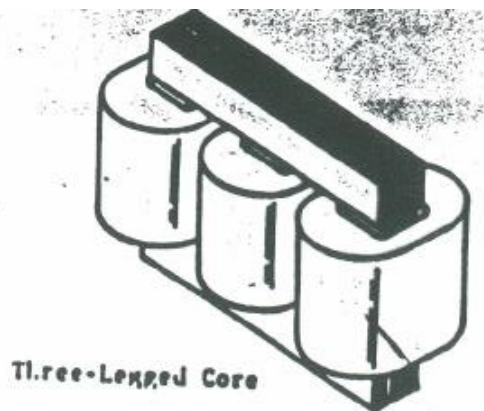
2. Transformador de cinco columnas.

Una alternativa al transformador de 3 columnas es el transformador de 5 columnas.



Es utilizado en transformadores de gran porte cuando el tamaño del mismo es una restricción, fundamentalmente para su transporte. Con este tipo de núcleos, donde el flujo se cierra por las columnas laterales, se logra reducir apreciablemente la sección de las culatas horizontales por lo que se reduce la altura total del transformador.

En la figura que sigue se puede apreciar transformadores de tres y cinco columnas.

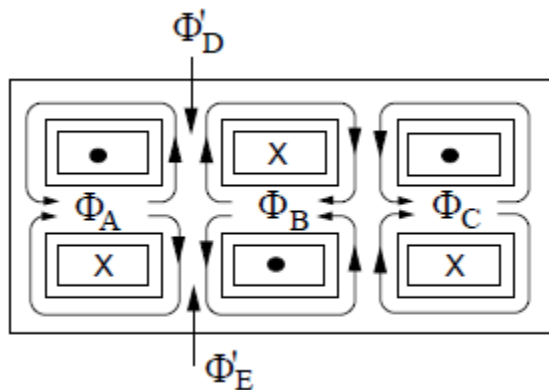


Una variante intermedia entre el núcleo de tres columnas y el de cinco columnas es el de cuatro columnas.

3. Transformador Acorazado (Shell Type).

El diseño y construcción de transformadores del tipo acorazado es una alternativa a las vistas anteriormente pero mucho menos difundida para transformadores tanto de transmisión como de distribución; el motivo fundamental es que no presenta ventajas frente a por ejemplo el transformador de tres columnas y este último implica un proyecto más sencillo y económico que el acorazado.

En la figura que sigue se presenta el núcleo de un transformador tipo acorazado con la disposición de sus bobinas.



Transformador tipo acorazado

4. Comparación banco trifásico con transformadores trifásicos de tres columnas.

- Comportamiento eléctrico idéntico en régimen equilibrado; en régimen desequilibrado presentan impedancias homopolares distintas.
- Transformador trifásico opción más económica pues implica menos hierro
- Transformador trifásico menor volumen por lo tanto menor pérdidas en el hierro.
- Transformador trifásico ante una avería se pierde todo el transformador.
- Banco trifásico ante una avería no necesariamente se pierde toda la unidad trifásica. Reserva de 33% suficiente.
- Banco trifásico mayor facilidad para el transporte en caso de unidades de gran tamaño.

5. Clasificación de los transformadores según su circuito magnético.

De dependiendo de la interacción de las fuerzas magneto motrices en las mallas de los circuitos magnéticos resultantes se define:

- Transformadores de flujos libres.

Resultan de circuitos magnéticos independientes donde no hay acoplamiento magnético entre las distintas fases.

Los bancos de transformadores son un ejemplo de este tipo de transformadores; por estar el transformador trifásico formado a partir de tres transformadores monofásicos idénticos con sus núcleos totalmente independientes, no existe acoplamiento magnético entre las distintas fases.

- Transformadores de flujos forzados.

En estos transformadores el flujo magnético de una fase depende de las fuerzas magneto motrices de las tres fases.

Dentro de este grupo están los transformadores de tres, cuatro y cinco columnas.

- Sistemas magnéticos casi independientes.

Se trata de transformadores de flujo forzado pero que con mínimas aproximaciones se se pueden considerar como de flujos libres.

Dentro de este grupo están los transformadores acorazados.

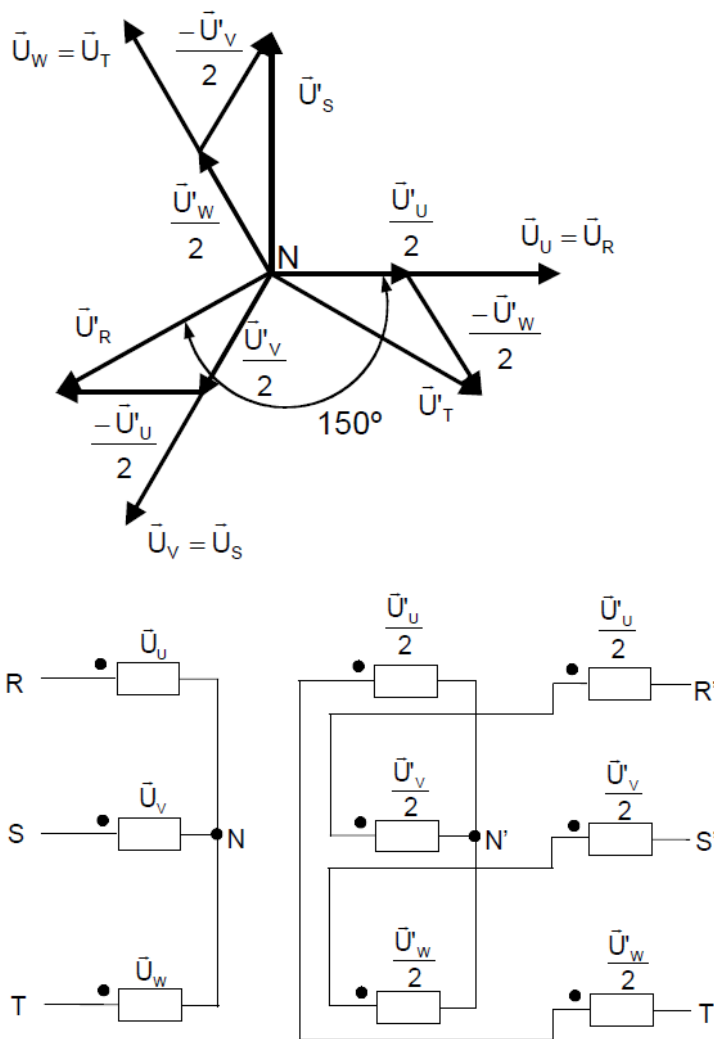
6. Conexiones de transformadores trifásicos.

Los primarios y secundarios de los transformadores trifásicos pueden conectarse tanto en estrella Y como en triángulo D las cuales son conexiones ya conocidas.

Otra opción es la conexión en zig-zag (Z) la cual abordaremos a continuación.

Consiste en dividir el bobinado de cada columna de un transformador trifásico en dos partes iguales y conectar cada mitad, en serie con una mitad del bobinado de la columna siguiente y así sucesivamente; la conexión se debe realizar con polaridades opuestas.

Analicemos el caso de un transformador conectado su primario en Y y su secundario en z; conexión (Yz). Asumimos fuente perfecta de secuencia directa.



Se observa que las tensiones fase neutro secundaria son el resultado de restar dos tensiones de valor $\frac{N_2}{N_1} \frac{U/\sqrt{3}}{2}$ desfasados 120° por lo tanto la tensión fase neutro será:

$\sqrt{3} \frac{N_2}{N_1} \frac{U/\sqrt{3}}{2}$ por lo que la tensión de línea secundaria será: $\sqrt{3} \frac{N_2 U}{N_1 2}$; donde U es la tensión de línea primaria, N_1 es el número de vueltas de la bobina primaria y N_2 es total de vueltas de la bobina secundaria.

Conclusión:

Relación de transformación	$\frac{N_2 \sqrt{3}}{N_1 2}$
Índice horario	5 (9, 1)

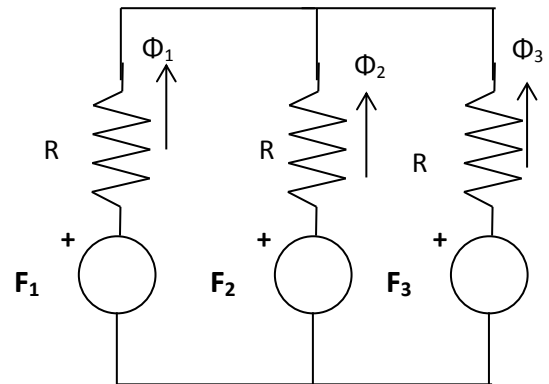
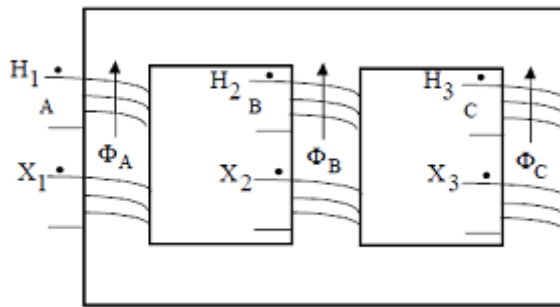
Esto último deja de manifiesto algo ya conocido: la relación de transformación en un transformador trifásico no es lo mismo que la relación de vueltas.

La siguiente tabla sintetiza esto para los distintos grupos de conexión.

GRUPO DE CONEXIÓN	RELACIÓN DE TRANSFORMACIÓN (k)
Dd, Yy	$\frac{N_1}{N_2}$
Dy	$\frac{1}{\sqrt{3}} \cdot \frac{N_1}{N_2}$
Yd	$\sqrt{3} \cdot \frac{N_1}{N_2}$
Dz	$\frac{2}{3} \cdot \frac{N_1}{N_2}$
Yz	$\frac{2}{\sqrt{3}} \cdot \frac{N_1}{N_2}$

Salvo en las conexiones Yy o Dd la relación de transformación no coincide con la relación de vueltas.

7. Transformador trifásico de tres columnas en régimen equilibrado.



Dónde: $F_1 = N_p i_{p1} - N_s i_{s1}$

$$F_2 = N_p i_{p2} - N_s i_{s2}$$

$$F_3 = N_p i_{p3} - N_s i_{s3}$$

Se cumple: $F_1 + F_2 + F_3 = 0$

Los primarios y secundarios pueden estar conectados en Y, D, Z pero como se está en régimen equilibrado se cumple lo anterior.

Además: $\phi_1 + \phi_2 + \phi_3 = 0$

Entonces: $F_1 - F_2 = \mathcal{R}(\phi_1 - \phi_2)$

$$F_2 - F_3 = \mathcal{R}(\phi_2 - \phi_3)$$

Restando se tiene: $2F_2 - (F_3 + F_1) = \mathcal{R}(2\phi_2 - \phi_1 - \phi_3)$

Sustituyendo $F_1 + F_3 = -F_2$

$$\phi_1 + \phi_3 = -\phi_2$$

Entonces: $F_1 = \mathcal{R}\phi_1$

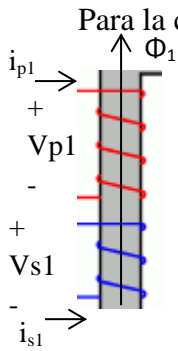
$$F_2 = \mathcal{R}\phi_2$$

$$F_3 = \mathcal{R}\phi_3$$

En régimen equilibrado cada columna se comporta en forma independiente.

Se puede considerar cada columna en forma aislada de las restantes.

Como no se están considerando flujos de fuga los flujos mencionados anteriormente son todos flujos mutuos.



Columna 1 del transformador.

La relación entre flujo y corriente está dada por lo determinado anteriormente.

$$v_{p1} = R_p i_{p1} + N_p \frac{d\phi_1}{dt} = 0$$

$$v_{s1} = -R_s i_{s1} + N_s \frac{d\phi_1}{dt} = 0$$

$$F_1 = \mathcal{R}\phi_1 \Rightarrow N_p i_o = \mathcal{R}\phi_1 \text{ Con } i_o = i_{p1} - \frac{N_s}{N_p} i_{s1}$$

$$e_p = N_p \frac{d\phi_1}{dt}$$

$$e_s = N_s \frac{d\phi_1}{dt}$$

Sustituyendo el flujo se llega a la inductancia magnetizante:

$$L_m = \frac{N_p^2}{\mathcal{R}}$$

Además se cumple: $\frac{e_p}{N_p} = \frac{e_s}{N_s}$

Se concluye que se obtiene el circuito equivalente en parámetros concentrados que habitualmente se utiliza para transformadores monofásicos.

Se observa que para simplificar el análisis no se consideraron flujos de fugas; si se hubieran considerado entonces aparecen en el circuito las inductancias de fuga.

En régimen sinusoidal el circuito por fase queda entonces:

