



Campus Virtual FCEFyN
Universidad Nacional de Córdoba

TRANSFORMADORES TRIFÁSICOS

ELECTROTECNIA(IE)

29 DE ABRIL DE 2020

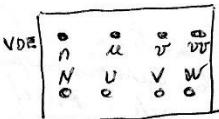
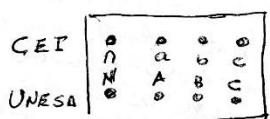
Transformadores trifásicos

Dado que una distribución trifásica implica una economía de materiales con respecto a la monofásica a igualdad de condiciones (Potencia, Distancia, Tensión de Línea y Precio de Tensión) resulta evidente la necesidad de utilizar la transformación trifásica en grandes líneas de transmisión para el transporte de la energía eléctrica.

Esas transformaciones pueden realizarse:

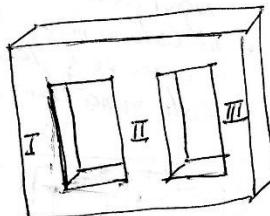
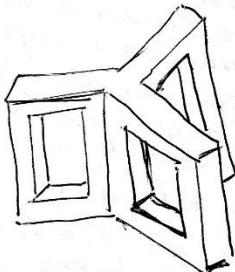
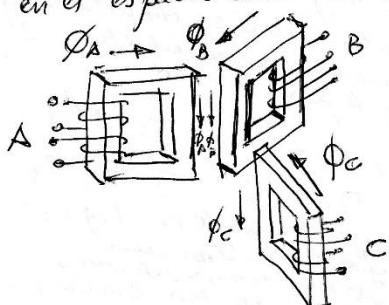
- Utilizando 3 transformadores monofásicos (que opera a flujo independiente) agrupados para constituir un banco trifásico, para donde conectarse los bobinados primarios y secundarios independientemente en estrella o en triángulo.
 - Utilizando un transformador trifásico (que opera a flujo controlado) en donde los bobinados primarios y secundarios se devanan sobre un mismo núcleo.
- Hay diversas disposiciones de los transformadores trifásicos pero los 2 principales se derivan de los tipos ventana y acorazado.

La designación de bornes correspondientes a un TRAFO trifásico se hace según las normas CEEI y la recomendación de UNESA y análogamente según las normas VDE.

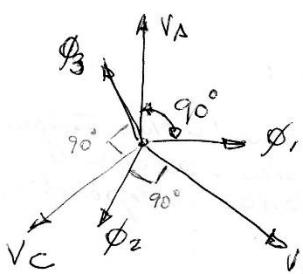


En ambos se utilizan las letras mayúsculas para los bornes de alta tensión y las minúsculas para los bornes de baja tensión.

Supongamos conectar 3 unidades monofásicas (Tipo Ventana) distintas en el espacio con las celtas en estrella como muestra la figura.



En un sistema de fases equilibrados, las tensiones de red están desfasadas 120° eléctricos entre sí y dan lugar en los devanados primarios a tres flujos desfasados 90° en retraso como indica la Fig.



En diagrama se observa que los flujos están también desfasados 120° entre sí cumpliéndose que la suma fasorial en cada una de las fases será nula:

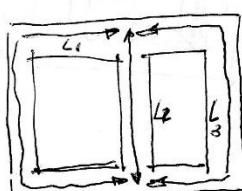
$$\bar{\phi}_1 + \bar{\phi}_2 + \bar{\phi}_3 = 0$$

En consecuencia si se unen los núcleos en uno solo, en la columna central circular el flujo resultante, que será nulo en todo instante. Por lo tanto podemos eliminar esta rama si se cumple la condición de simetría para el flujo y modificar el circuito magnético espacial por uno plano, donde se han situado las bobinas en el mismo plano con la consiguiente separación desde el punto de vista constructivo. consiguiéndose un considerable ahorro de material.

Los bobinados primarios y secundarios de cada fase se bobinan en cada columna.

Cuando se usa núcleos simétricos los tres de flujo recorren el circuito magnético comprendido entre las bobinas separadas e inferior, dando lugar a un potencial magnético entre ellos nulo. En el núcleo se reparte el flujo entre las dos laterales de la columna central, mientras que el resto del circuito magnético a su vez las laterales cierran el circuito magnético.

En la figura se indican las longitudes medios del circuito magnético de las 3 ramas que son proporcionales a sus distancias al suponer constante la sección y la permeabilidad.



$$R = \frac{L}{\mu_s} = K \cdot l \Rightarrow R_1 = K \cdot l_1, \quad R_2 = K \cdot l_2, \quad R_3 = K \cdot l_3$$

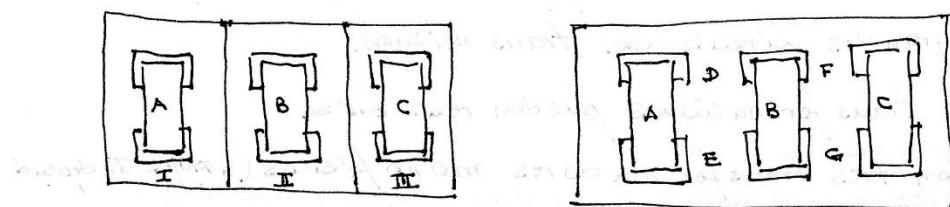
Los FMM son $F_1 = \bar{\phi}_1 \cdot R_1$, $F_2 = \bar{\phi}_2 \cdot R_2$, $F_3 = \bar{\phi}_3 \cdot R_3$

Como se observa los FMM no son iguales porque $R_2 < l_1 \neq l_3$. Esto indica que los corrientes magnéticas tienen diferentes intensidades dependiendo de las distancias de los devanados de las ramas laterales a la central. Por lo tanto la sección del núcleo producirá diferentes valores como los contenidos de vacío.

Las ramas laterales a la central, por lo tanto la sección del núcleo producirá diferentes valores como los contenidos de vacío.

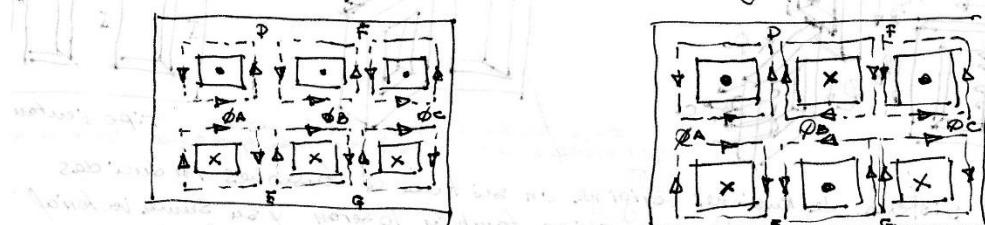
Esta disposición tiene cierta simetría en los flujos y por lo tanto en las corrientes de vacío. En carga la desigualdad de la corriente es insignificante y además se minimiza aumentando la sección de los cuálatos con relación al núcleo central.

Si agrupamos tres transformadores acorazados monofásicos ubicados uno al lado del otro tocándose entre sí sus núcleos I, II, III. Con A, B y C se han indicado los bobinados Primario y Secundario de cada uno de ellos.



En la otra figura se ha dibujado un transformador acorazado trifásico, donde la diferencia estriba en que los núcleos no están separados, siendo que las chapas están entrelazadas entre sí, por lo tanto los flujos debidos a las diferentes fases se superponen en las ramas DE y FG, lo que permite un importante ahorro de material magnético.

Según el sentido de enrollamiento relativo en que se ubican los bobinados, el flujo en las ramas DE y FG se suman o restan.

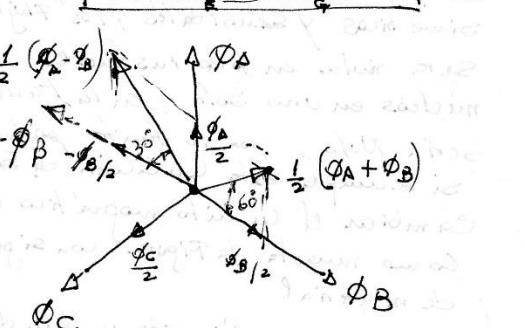


Se demuestra:

$$\frac{1}{2} (\phi_A + \phi_B) = \sqrt{3} \frac{1}{2} (\phi_A - \phi_B)$$

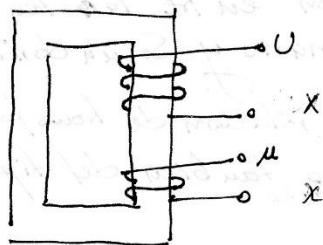
En consecuencia para tener la misma inducción B en la rama DE de cada caso se deben tener una sección tres veces mayor en el primer caso.

$$B = \frac{\Phi}{S}$$



Desfase entre tensiones en un Trafo Monoar

Polaridad de los Bobinados



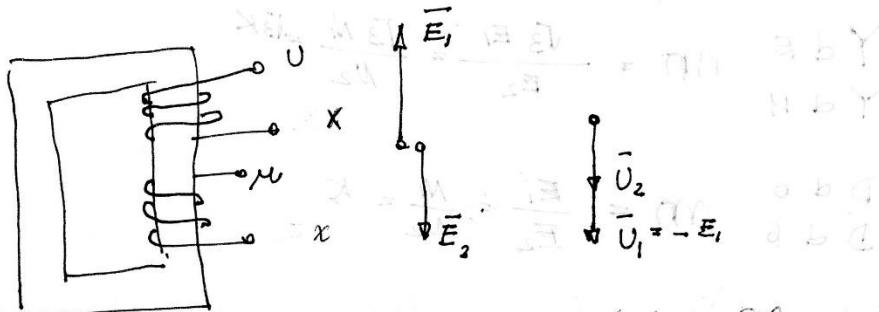
$$\begin{array}{c} \vec{E}_1 \\ \vec{E}_2 \\ \downarrow \end{array}$$

$$\begin{array}{c} \vec{U}_2 \\ \downarrow \end{array}$$

$$\vec{U}_1 = -\vec{E}_1$$

En la Fig se ve el esquema de un transformador Monoarco cuyos zanahuarios están devanados en el mismo sentido. Como ambos están atravesados por el mismo flujo, las F.E.M. están en fase y las tensiones en oposición de fase.

En la siguiente Fig observamos lo mismo pero con un transformador cuyos devanados se han realizado en sentido contrario, y los sentidos relativos de tensiones son ahora diferentes al caso anterior.



Se observa que de acuerdo al sentido en que están devanados los zanahuarios el desfase entre las tensiones primarias - según viene puede ser Nulo o de 180° .

Relación de Transformación Trifásica

En los transformadores trifásicos se define la relación de transformación como la relación entre la tensión compuesta (o de linea) entre primario y secundario.

Esta relación depende no solo de la relación de transformación de cada unidad en particular, sino también del tipo de conexión empleado.

Llamamos M a la relación entre tensiones de líneas de entrada y salida, para cada conexión se tiene:

$$Y \text{ y } 0 \quad M = \frac{\sqrt{3} E_1}{E_2} = \frac{N_1}{N_2} = K$$

$$Y \text{ y } 6 \quad M = \frac{\sqrt{3} E_1}{E_2} = \frac{N_1}{N_2}$$

$$D \text{ y } 3 \quad M = \frac{E_1}{\sqrt{3} E_2} = \frac{N_1}{\sqrt{3} N_2} = \frac{K}{\sqrt{3}}$$

$$Y \text{ d } 5 \quad M = \frac{\sqrt{3} E_1}{E_2} = \frac{\sqrt{3} N_1}{N_2} = \sqrt{3} K$$

$$D \text{ d } 0 \quad M = \frac{E_1}{E_2} = \frac{N_1}{N_2} = K$$

En los transformadores trifásicos aparecen algunas diferencias con el monofásico que debemos considerar. Por una parte se modifica la relación de transformación de acuerdo al conexionado de los devanados λ o Δ . Como se ha desarrollado en el punto anterior. Por otra parte se produce un desfasaje entre las tensiones primarias y secundarias en cada bobinado que depende del sentido en que estén devanados los arrallamientos y al conexionado de los mismos que pasamos a desarrollar.

Desfasaje entre tensiones en un tramo trifásico

Esgue mane de Conexión

El angulo de fase de la tensión inducida secundaria en cada fase con respecto a la tensión primaria depende exclusivamente de la conexión interna del transformador. Este angulo indica el retraso de la tensión de Salida (letras minúsculas) con relación a la tensión de entrada (letras mayúsculas). Los diferentes conexiones están normalizadas, y se las conoce con el nombre de conexiones horarias por la Señal que hoy en día tiene la posición de los ~~desfases de tensiones~~ con las agujas del Reloj:

Hora	0	6	11	5
Desfasaje angular	0°	180°	330°	150°

El desfasaje angular señala el retraso de la baja tensión respecto de la alta, en el sentido del orden cíclico UVW

Hora/G	CONEXION	El desfasaje
0	D d 0	Se obtiene multiplicando el número que acompaña la denominación por 30°
	Y y 0	Por Ej: para Y y 0 el
6	D d 6	desfasaje se calcula
	Y y 6	$6 \times 30^\circ = 180^\circ$
11	D y 11	
	Y d 11	
5	D y 5	
	Y d 5	

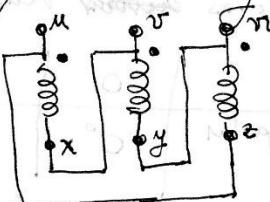
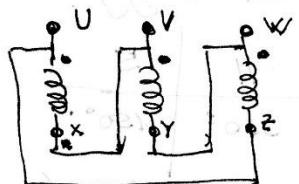
Desigñamos con $U V W$ los bornes de entrada de línea al primario y con $u v w$ los bornes de salida del secundario.

Con un punto se indica la polaridad relativa de cada par de arrollamiento primario y secundario. Tomando como referencia la tensión de fase $U - u$ del primario observamos cuál es el desfaseje del secundario con respecto a esa referencia. En la conexión D d 0 el primario y el secundario están conectados en triángulo (Δ - Δ).

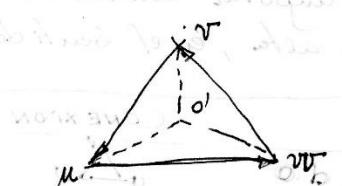
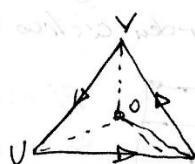
En cada fase los factores E_1 y E_2 están en coincidencia de fase.

Las tensiones de línea correspondientes a uno mismo ramo.

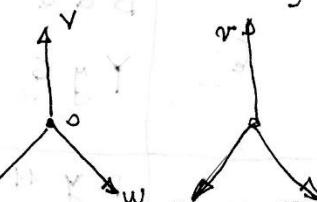
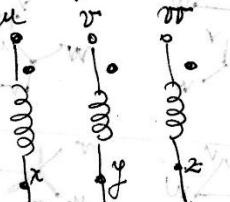
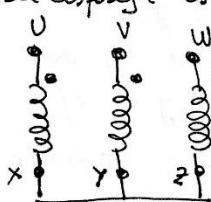
Del circuito magnético deben tener el mismo sentido (UV y uv) referidos al centro de estrella primario O y secundario O' .



Los bobinados de fase se marcan con el punto de referencia y de acuerdo como se tiene la salida o bien los distintos casos.

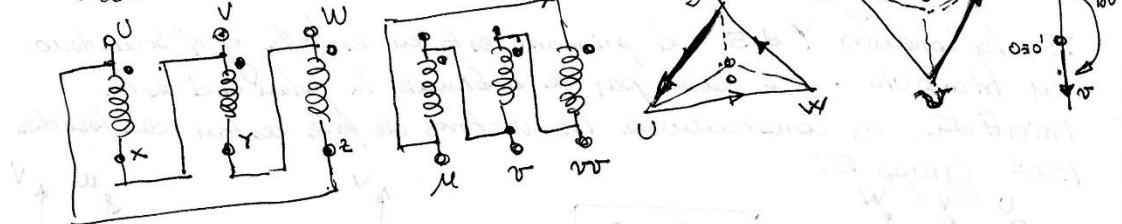


En la conexión Y y 0, el primario y el secundario están conectados en estrella. En cada fase E_1 y E_2 están en coincidencia de fase y su desfaseje es cero.



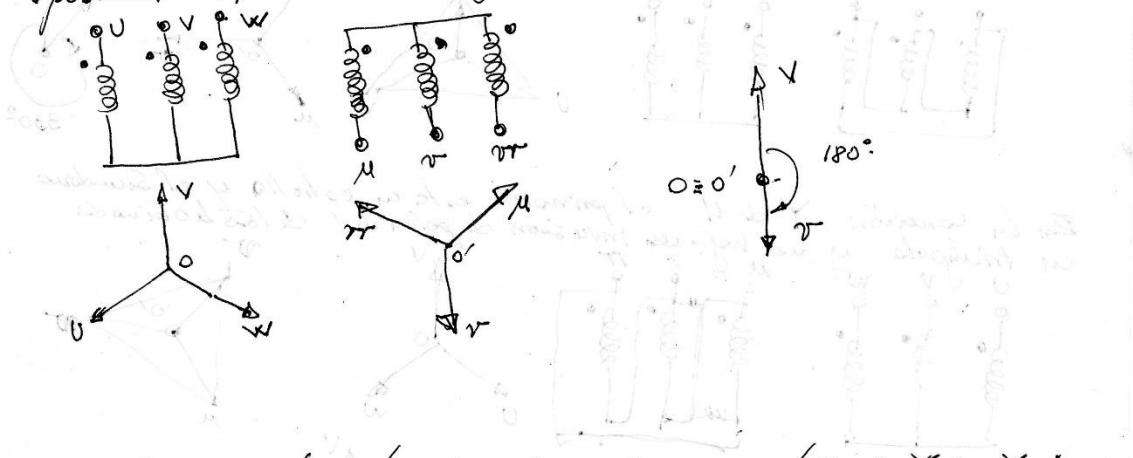
En la conexión Dd6 el primario y el secundario están conectados en triángulo pero en cada par de bobinas la polaridad está invertida, por lo que las tensiones de línea correspondientes a una misma rama tienen sentidos opuestos. Del circuito magnético deben tener sentidos opuestos.

(vectores $\bar{U}V$ y $\bar{W}V$ por ej). En consecuencia los vectores de fase resultan opuestos y desfasados 180° grupo 6.

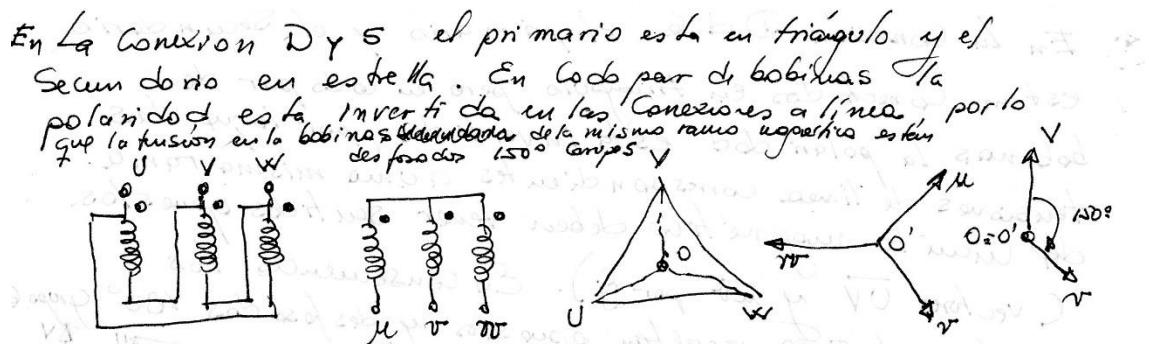


En la conexión Yy6 el primario y el secundario están conectados en estrella pero cada par de bobinas tienen la polaridad invertida en las conexiones a línea, por lo que las tensiones de fase correspondientes a una misma rama del circuito magnético tienen sentidos opuestos. A una misma rama del circuito magnético tienen sentidos opuestos.

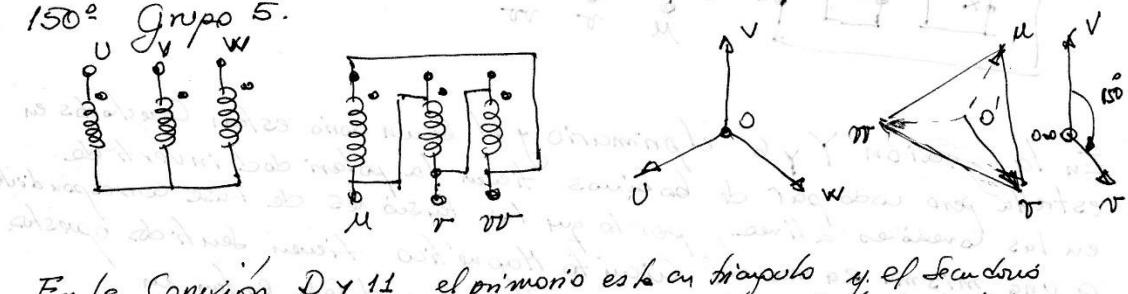
(\bar{U} y \bar{W} por ej) en consecuencia los vectores de fase están en oposición de fase de 180° grupo 6.



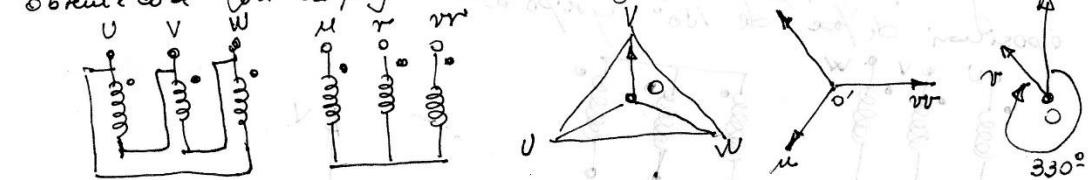
A continuación ahorre las conexiones compuestas $\Delta\Delta$ y $Y\Delta$



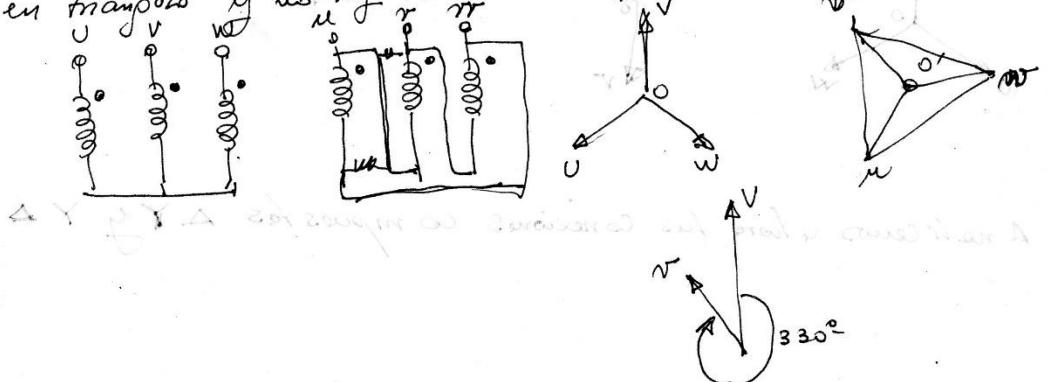
En la conexión Y d 5 el primario está en estrella y el secundario en triángulo. En cada par de bobinas la polaridad es la inversa, en consecuencia los vectores de fase están desfasados 150° Grado 5.



En la conexión D y 11 el primario está en triángulo y el secundario en estrella y los bobinados la polaridad no está invertida obteniéndose un desfase de 330° grupo II.



En la conexión Y d 11 el primario está en estrella y el secundario en triángulo y no hay inversión de polaridad de los bobinados.



Conexión de los transformadores trifásicos

Conexión estrella - estrella ($Y-Y$)

En este tipo de conexión los devanados primarios y secundarios se conectan en estrella, y se puede llevar el neutro tanto al primario como al secundario.

La relación de transformación simple K se determina como cociente entre el número de espiras de una fase del primario y otra del secundario

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

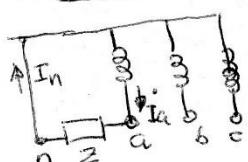
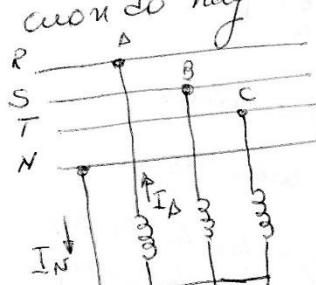
La relación de transformación compuesta m es el cociente entre las tensiones de líneas del primario al secundario en vacío.

$$m = \frac{V_{AB}}{V_{ab}} = \frac{\sqrt{3} E_1}{\sqrt{3} E_2} = \frac{E_1}{E_2} = K$$

Así en la conexión estrella - estrella

$$m = K$$

El principal inconveniente de esta conexión es el de equilibrio de las tensiones en la línea conectada al primario que aparece cuando hay fuertes desequilibrios en la carga secundaria



Así cuando hay neutro en ambos devanados y se sobrecarga la fase secundaria I_a , en mucho mayor medida que la fase primaria I_A provocará una corriente de tensión y por lo tanto un conductor de línea que en los otros imparcialmente en un conductor de línea que en los otros

Note que I_A e I_a se cierran por el neutro y no por las otras fases. Si solo se dispone de neutro en el secundario el desequilibrio es aun mayor porque I_A circula por las fases I_B e I_c provocando una asimetría en los flujos y por lo tanto en los fém del primario y secundario.

Una ventaja muy interesante es la posibilidad de sacar neutro tanto en el lado de BT como en el AT. El neutro permite obtener 2 tensiones como ej (380/220V) o conectarlo a tierra como en cierto tipo de instalaciones.

Por aplicarse a cada fase $\frac{V_L}{\sqrt{3}}$, se pone de des mir el nº de espiras, aunque se debe aumentar la sección de los conductores porque la corriente que atraviesa la fase es I_L . Esto ~~deriva en~~ aporta más económicos y el aumento de la sección favorece la resistencia a los esfuerzos de cortocircuito.

Conexión triángulo - triángulo (D^d)

En este tipo de conexión tanto el primario como el secundario

se conectan en triángulo.

La relación de transformación simple

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

La relación de transformación compuesta

$$m = \frac{V_{AB}}{V_{ab}} = \frac{E_1}{E_2} = K$$

igual que en la conexión estrella

$$M = K$$

Entre las ventajas de este conexión podemos decir:

Entre las desventajas de este conexión no disponemos de salida de neutro en ambos bobinados como no dispone de salida de neutro en ambos bobinados se limita su utilización.

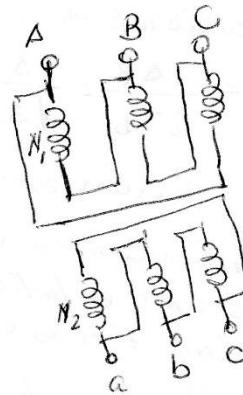
En esta conexión cada bobinado debe soportar la tensión de la red (D^d compuesta) lo que provoca un aumento del nº de espiras.

Entre las ventajas tenemos que los desequilibrios motivados por las corrientes en el secundario se reparten igualmente entre las fases.

El primario evita los desequilibrios en los flujos magnéticos.

Por cada fase circula $I_L/\sqrt{3}$ permitiendo des mir los conductores.

Por cada fase circula $I_L/\sqrt{3}$ permitiendo des mir los conductores.



Conexión Estrella - Triángulo ($\text{Y}-\Delta$)

Esta conexión no tiene problemas con los componentes de tercer armónico de tensión porque dan lugar a una circulación de corriente en el lado conectado en triángulo. La conexión se comporta razonablemente bien bajo cargas desequilibradas ya que el triángulo redistribuye parcialmente cualquier desequilibrio que se presente.

Sin embargo, este dispositivo debido a la conexión triángulo las tensiones secundarias sufren un desplazamiento de 30° con respecto a las tensiones del primario, lo que puede causar inconvenientes al conectar en paralelo las secundarias de 2 grupos de transformadores.

Esta conexión se adapta bien para el uso de transformadores de alta tensión como reductores de tensión de líneas.

Conexión Triángulo - Estrella ($\Delta-\text{Y}$)

Este conexión presenta las mismas ventajas y el mismo desplazamiento de fase que la conexión $\text{Y}-\Delta$.

Se utiliza como transformador elevador en las redes de AT.

El empleo de la conexión en estrella en la parte de alta tensión permite poner a tierra el punto neutro, con lo que queda limitado el potencial sobre cualquiera de las fases, a la Tensión Simple del Sistema, reduciéndose el costo de los devanados de AT.

Esta conexión es también muy utilizada en los transformadores de distribución, correspondiendo la estrella al lado de B.T., que permite de este modo alimentar cargas trifásicas y monofásicas. El primario conectado en triángulo tiene de compensar los desequilibrios producidos por las cargas monofásicas.