

UNIVERSIDAD NACIONAL DEL CALLAO

FACULTAD DE INGENIERIA ELECTRICA Y ELECTRONICA

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERIA ELECTRICA

ASIGNATURA:

MAQUINAS ELECTRICAS I

TEMA:

**CONEXIONES TRIFASICAS ESPECIALES DE
TRANSFORMADORES Y PUESTA EN PARALELO DE
TRANSFORMADORES.**

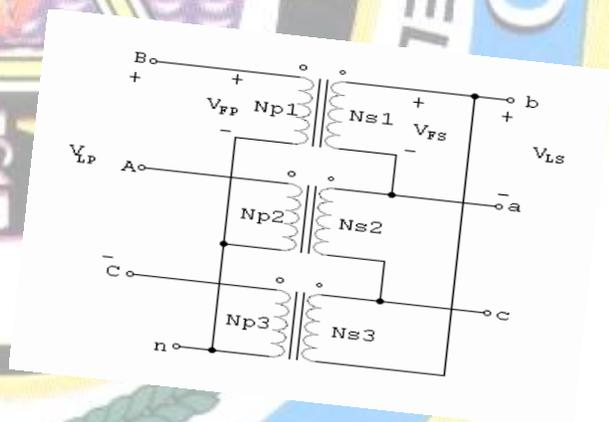
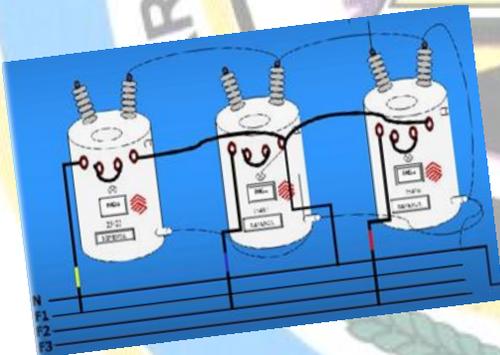
PROFESOR:

Ing. CASTRO SALAZAR, Fredy Adán.

ALUMNO:

FLORES ALVAREZ ALEJANDRO

1023120103



Bellavista, 3 de Diciembre del 2013

PRESENTACIÓN

El desarrollo de este trabajo domiciliario está hecho con la finalidad de que el alumno investigue a fondo un poco más acerca del tema “Conexiones Trifásicas especiales de transformadores y puestas en paralelo”; tiene que ver con todas las conexiones disponibles que se puede hacer en un transformador analizando detalladamente como y cuando se conectan dichos equipos eléctricos ya sea para compensar la potencia y cuáles son las características más importantes que deben de cumplir para hacer dichas conexiones y cuáles son las ventajas de cada una de ellas.

Hablaremos también de las conexiones más frecuentes o las más conocidas que existen en el estudio, como también complementaremos del tema de conexiones especiales, analizaremos cada caso con sus respectivos diagramas para que sea fácil de entender y usaremos palabras fáciles de comprender.

Un estudiante universitario debe estar en permanente búsqueda del perfeccionamiento en su formación académica, profesional y social; ser un apasionado por el conocimiento, buscar constantemente la excelencia y su independencia intelectual. El estudiante entonces será el principal responsable de su aprendizaje.

El presente trabajo está dirigido en especial a los alumnos de la UNAC y a todas las personas que tienen el deseo de aprender y superarse cada día más nutriéndose de conocimiento, aquí le mostraremos resumidamente el trabajo que lleva como título “Conexiones trifásicas Especiales de transformadores y puestas en paralelo”.



Dedicatoria

Este informe se lo dedicamos a todas las generaciones de nuestra facultad de, ingeniería eléctrica y electrónica, que pasaron por los laureles de la misma, en especial por los maestros quienes nos imparten sus conocimientos; que gracias a muchos o pocos de ellos, hoy en día nos forjamos un porvenir venidero de grandes éxitos, son ellos el pilar fundamental en nuestra formación como profesionales que de aquí a unos pasos lo seremos. Solo esperamos que estas acciones se sigan practicando para nuestro propio bienestar y el de futuras generaciones.

INDICE	PAG.
1.-INTRODUCCION	4
2.-OBJETIVOS	5
3.-FUNDAMENTO TEORICO	6 – 36
Construcción de Transformador trifásico	6 – 7
Grupo de Conexiones de Transformadores Trifásicos	7
CONEXIÓN DELTA – DELTA	8
CONEXION ESTRELLA – DELTA	10
CONEXION DELTA – ESTRELLA	11
CIRCUITO ESTRELLA – ESTRELLA	12
ÍNDICE HORARIO	13
CUADRO DE CONEXIONES NORMALES	16
CONEXIONES ESPECIALES DE LOS TRANSFORMADORES TRIFÁSICOS	
LA CONEXIÓN Δ ABIERTA (o V – V)	18
LA CONEXIÓN Y ABIERTA - Δ ABIERTA.	22
LA CONEXIÓN SCOTT-T	23
LA CONEXIÓN T TRIFÁSICA	25
CONEXIÓN DE TRANSFORMADORES TRIFÁSICOS EN PARALELO	
4.- CONCLUSIONES	43
5.-BIBLIOGRAFIA Y REFERENCIAS	44

INTRODUCCION

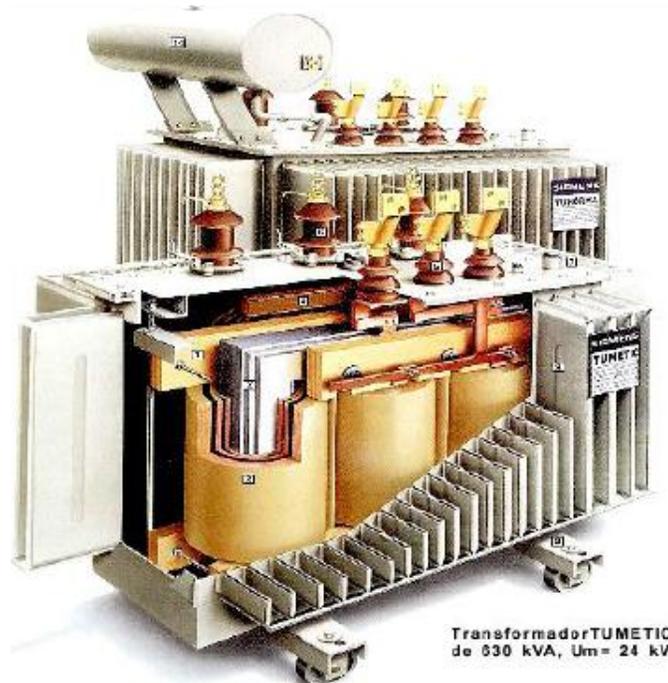
Los transformadores trifásicos son utilizados para el suministro o el transporte de energía a grandes distancias de sistemas de potencias eléctricas. Lo que normalmente conocemos como la distribución eléctrica, pero a grandes distancias.

Quizás haya oído hablar de los bancos de transformadores. Pues bien, los bancos de transformadores consisten en tres transformadores monofásicos conectados entre ellos para simular un transformador trifásico.

Esto estaría muy bien para el caso de que se desee tener un transformador monofásico de repuesto para los casos de averías, pero la realidad es que los transformadores trifásicos resultan más económicos, es decir, un transformador trifásico es más barato que tres transformadores monofásicos.

Además, está la relación de tamaño, un único transformador trifásico siempre será más pequeño que un banco de transformadores monofásicos. Tanto los bancos de transformadores monofásicos como el transformador trifásico se pueden conectar de diferentes formas

En el caso del transformador trifásico, solo hay que decir que los devanados de las bobinas están conectados internamente y, estas conexiones pueden ser en estrella o en triángulo.

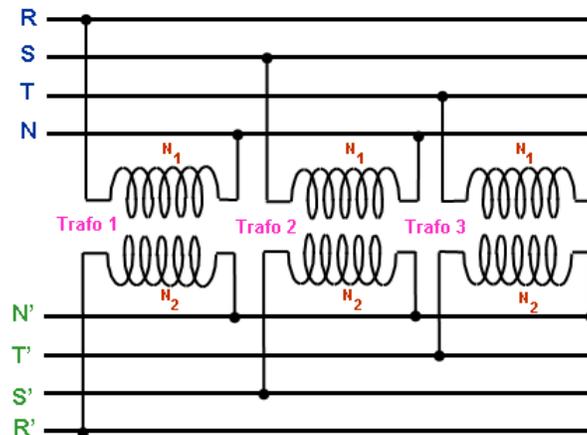


OBJETIVOS

- Familiarizarse con las bancadas trifásicas, así mismo determinar los diferentes grupos de conexiones.
- Conocer las conexiones más importantes de los transformadores.
- Comprobar la Relación de tensiones y corrientes en las diferentes conexiones que existen.
- Conociendo solo los bordes de la salida de la bancada trifásica, hallar o determinar todas las características de funcionamiento.
- Conocer profundamente las conexiones especiales que se realizan a transformadores trifásicos.

FUNDAMENTO TEORICO

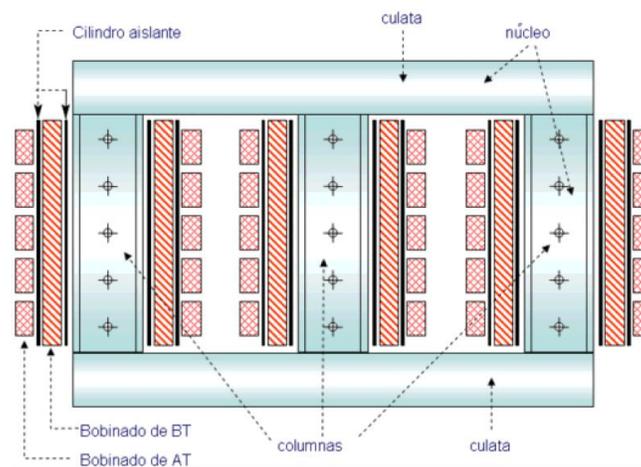
Construcción



Un sistema trifásico se puede transformar empleando 3 transformadores monofásicos. Los circuitos magnéticos son completamente independientes, sin que se produzca reacción o interferencia alguna entre los flujos respectivos.

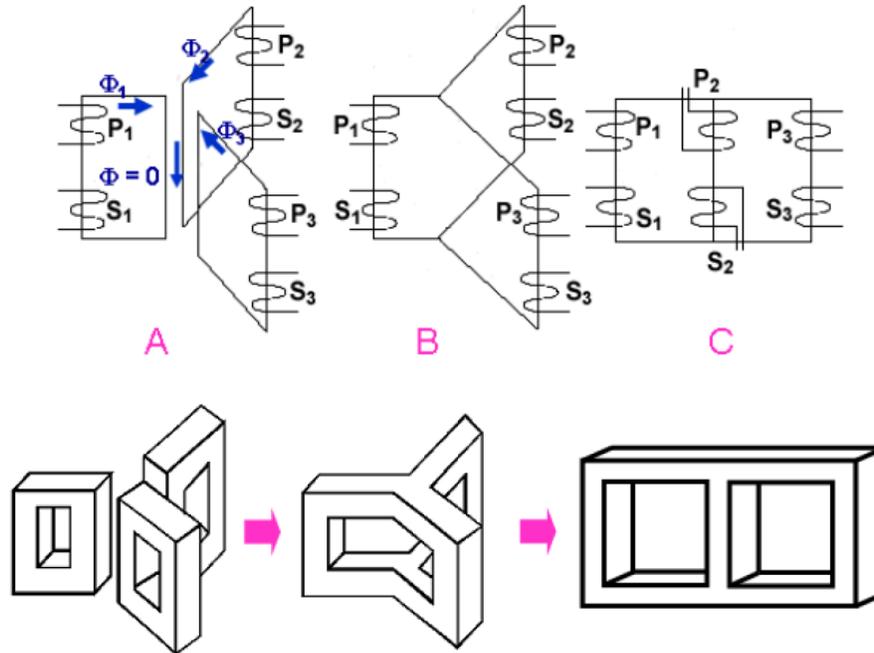
Otra posibilidad es la de utilizar un solo transformador trifásico compuesto de un único núcleo magnético en el que se han dispuesto tres columnas sobre las que sitúan los arrollamientos primario y secundario de cada una de las fases, constituyendo esto un transformador trifásico como vemos a continuación.

Transformador Trifásico



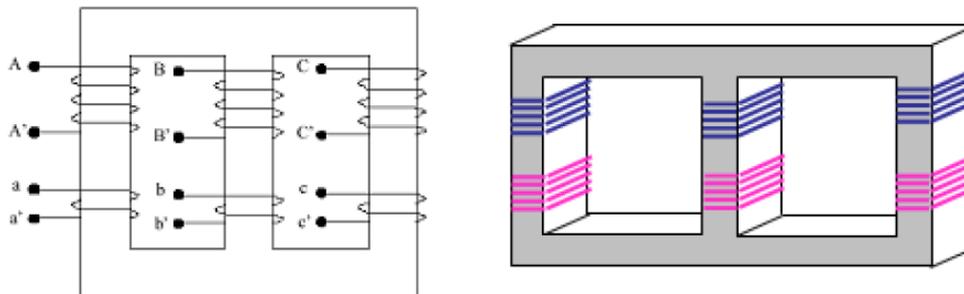
Si la transformación se hace mediante un transformador trifásico, con un núcleo común, podemos ver que la columna central (fig. A) está recorrida por un flujo F que, en cada instante, es la suma de tres flujos sinusoidales, iguales y desfasados 120° . El flujo F será pues siempre nulo.

En consecuencia, se puede suprimir la columna central (fig. B). Como esta disposición (fig. b) hace difícil su construcción, los transformadores se construyen con las tres columnas en un mismo plano (fig. C). Esta disposición crea cierta asimetría en los flujos y por lo tanto en las corrientes en vacío. En carga la desigualdad de la corriente es insignificante, y además se hace más pequeña aumentando la sección de las culatas con relación al núcleo central.



En un transformador trifásico cada columna está formada por un transformador monofásico, entonces toda la teoría aplicada en los transformadores monofásicos es válida para los trifásicos, teniendo en cuenta que las magnitudes que allí aparecen hace referencia ahora a los valores por fase.

Grupos de Conexión de los Transformadores Trifásicos



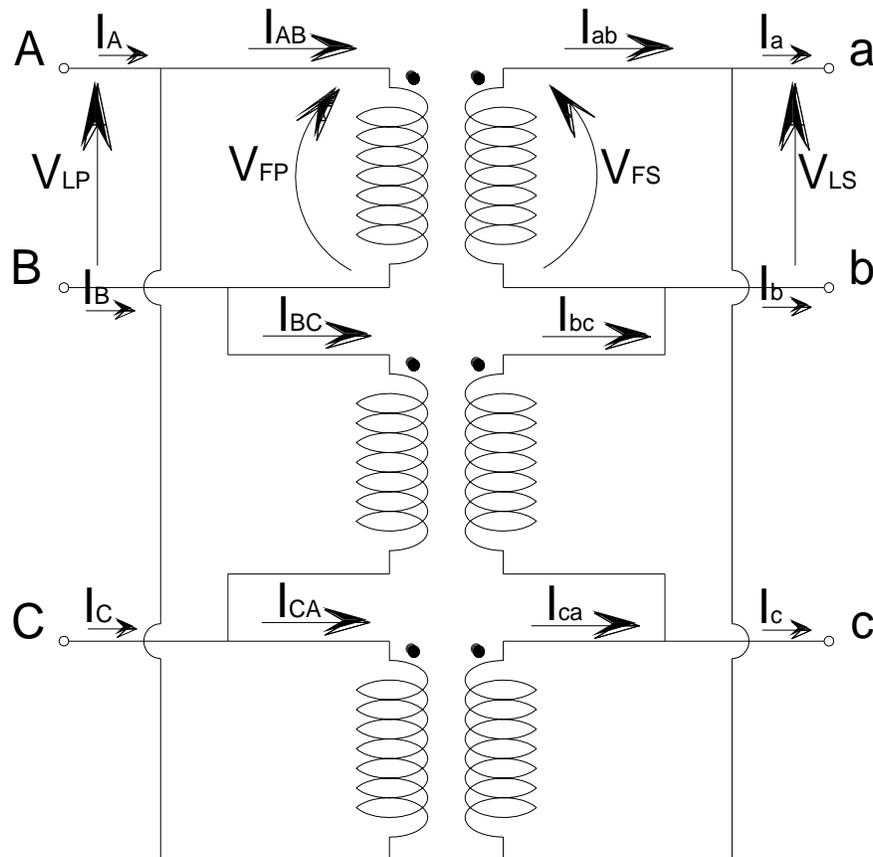
Para relacionar las tensiones y las corrientes primarias con las secundarias, no basta en los sistemas trifásicos con la relación de transformación, sino que se

debe indicar los desfases relativos entre las tensiones de una misma fase entre el lado de Alta Tensión y el de Baja Tensión.

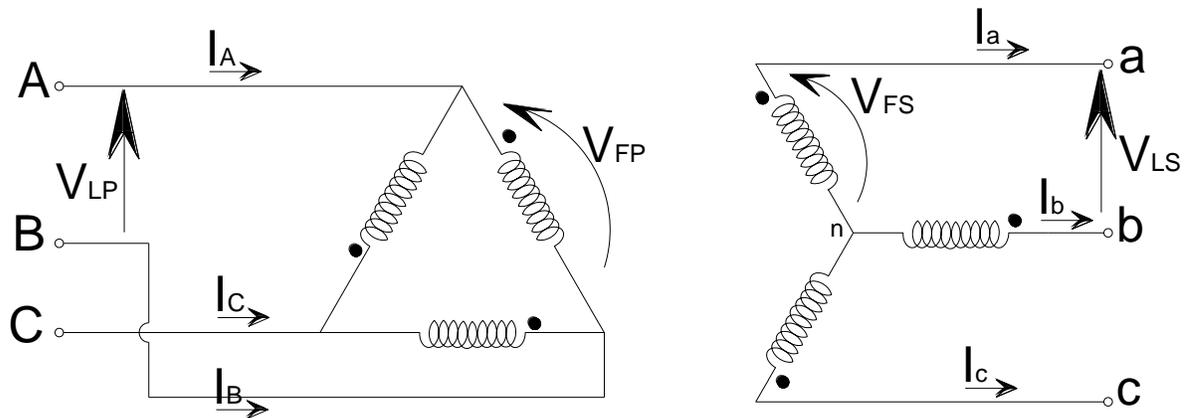
Una manera de establecer estos desfases consiste en construir los diagramas fasoriales de tensiones y corrientes, conociendo: la conexión en baja y alta tensión (estrella, triángulo o zig-zag), las polaridades de los enrollados en un mismo circuito magnético o fase, y las designaciones de los bornes.

Lo que se presentará a continuación son todos los tipos de conexiones para transformadores trifásicos: Delta-delta, delta-estrella, estrella-delta, estrella-estrella; también se mostrará mediante gráficas el cambio que sufren los valores de corriente y voltaje a lo largo de las líneas y fases del circuito.

CONEXIÓN DELTA - DELTA:



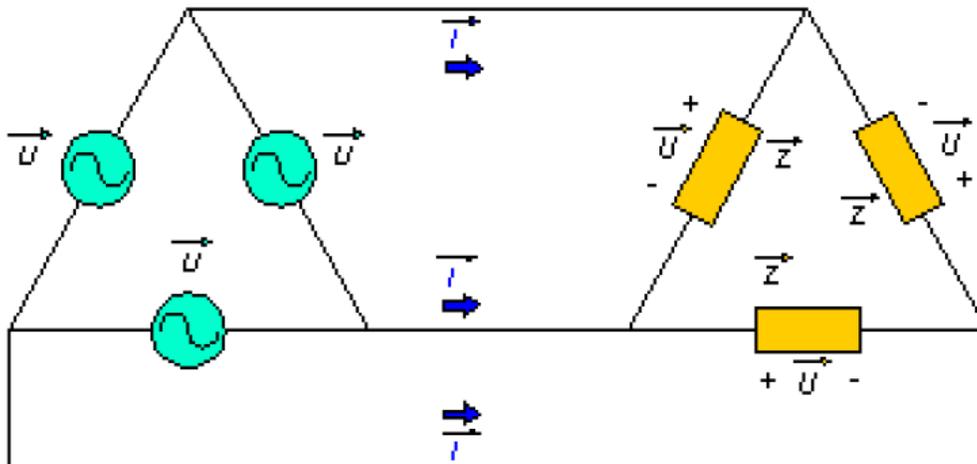
En esta conexión, el primario está conectado en Δ y el secundario en Δ .

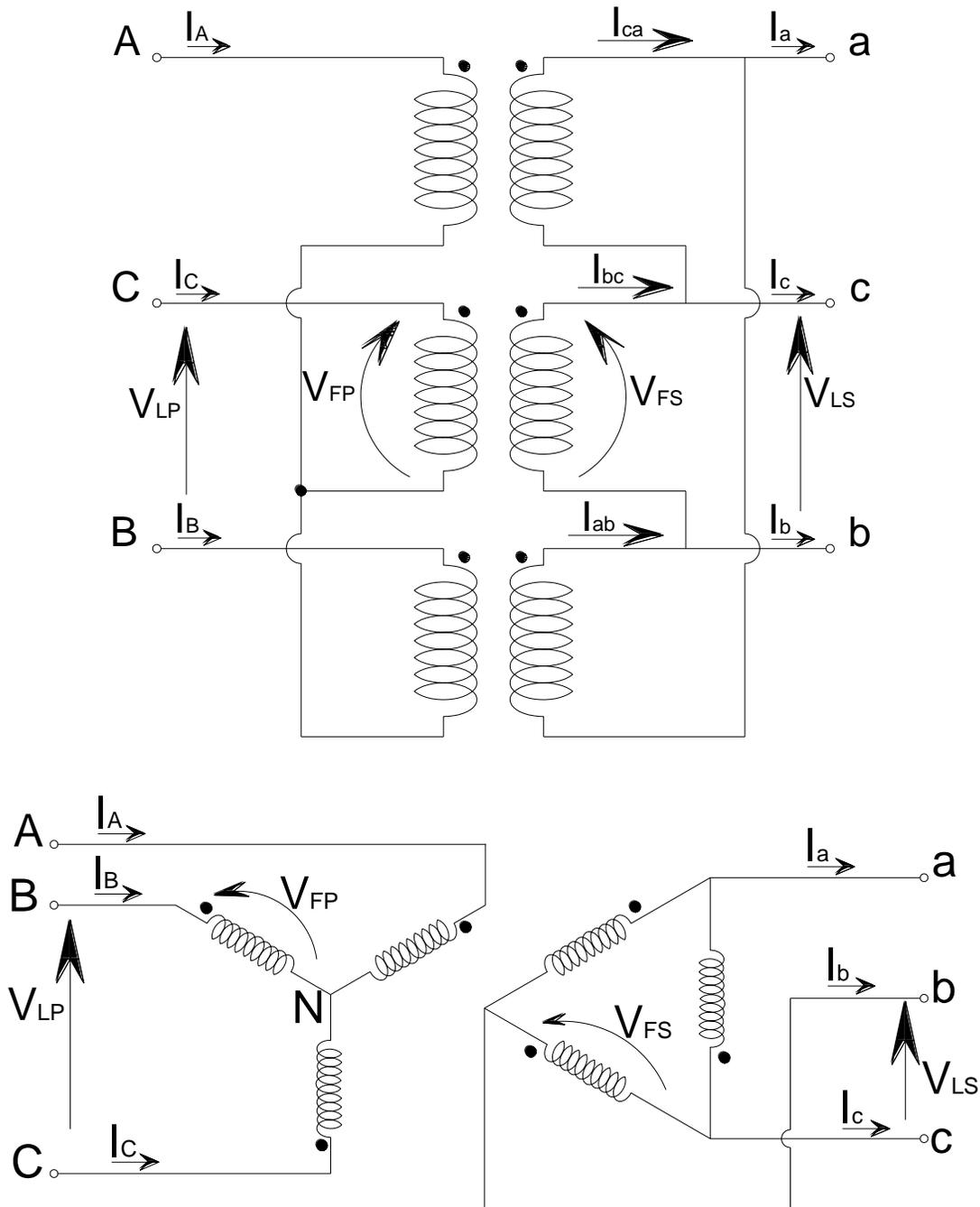


Se utiliza esta conexión cuando se desean mínimas interferencias en el sistema. Además, si se tiene cargas desequilibradas, se compensa dicho equilibrio, ya que las corrientes de la carga se distribuyen uniformemente en cada uno de los devanados.

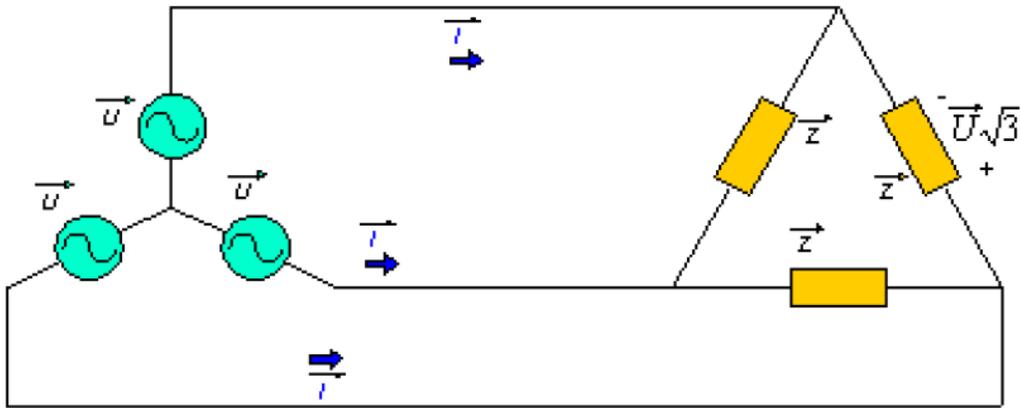
La conexión delta-delta de transformadores monofásicos se usa generalmente en sistemas cuyos voltajes no son muy elevados especialmente en aquellos en que se debe mantener la continuidad de unos sistemas. Esta conexión se emplea tanto para elevar la tensión como para reducirla.

En caso de falla o reparación de la conexión delta-delta se puede convertir en una conexión delta abierta-delta abierta.

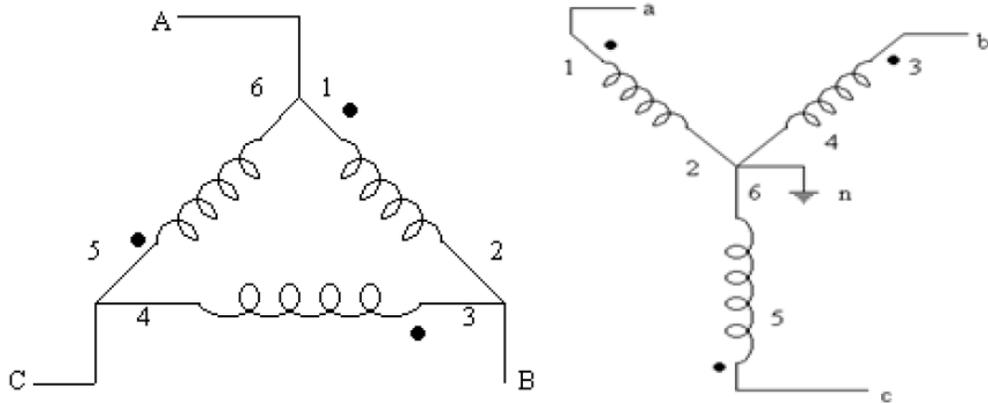


CIRCUITO ESTRELLA - DELTA:

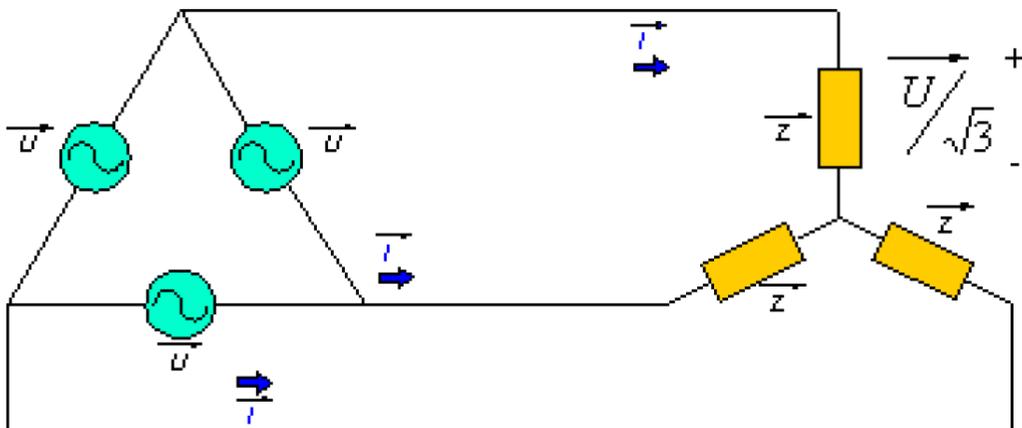
La conexión estrella-delta es contraria a la conexión delta-estrella; por ejemplo en sistema de potencia, la conexión delta-estrella se emplea para elevar voltajes y la conexión estrella-delta para reducirlos. En ambos casos, los devanados conectados en estrella se conectan al circuito de más alto voltaje, fundamentalmente por razones de aislamiento. En sistemas de distribución esta conexión es poco usual, salvo en algunas ocasiones para distribución a tres hilos.

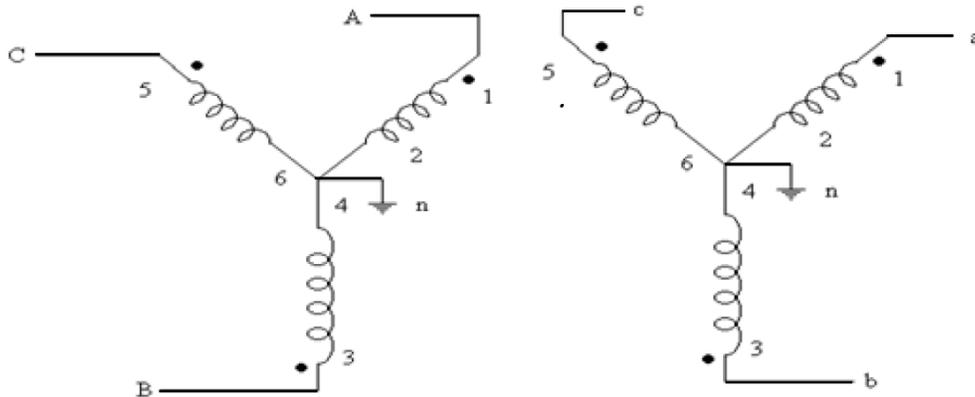


CIRCUITO DELTA - ESTRELLA:



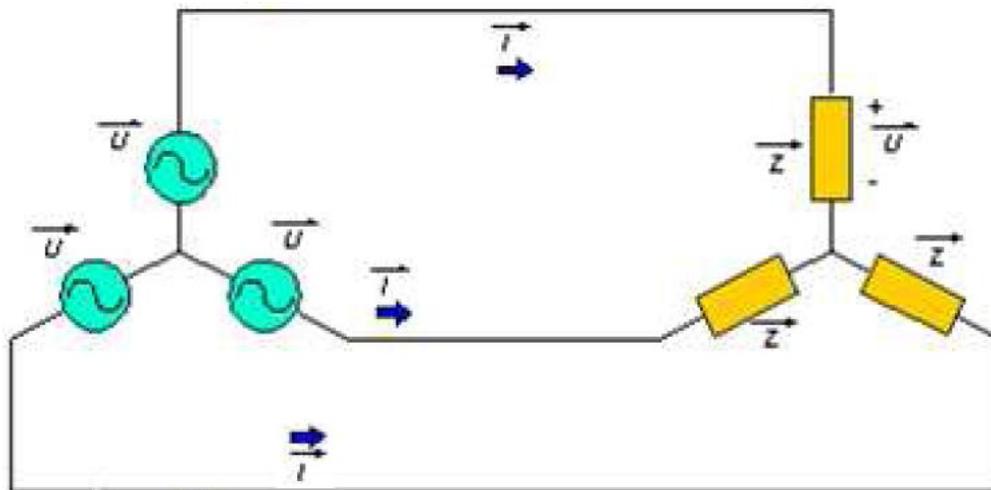
La conexión delta-estrella, de las más empleadas, se utiliza en los sistemas de potencia para elevar voltajes de generación de transmisión, en los sistemas de distribución (a 4 hilos) para alimentación de fuerza y alumbrado.



CIRCUITO ESTRELLA - ESTRELLA:

Las corrientes en los devanados en estrella son iguales a las corrientes en la línea. Si las tensiones entre línea y neutro están equilibradas y son sinusoidales, el valor eficaz de las tensiones respecto al neutro es igual al producto de $1/1.7320508$ por el valor eficaz de las tensiones entre línea y línea y existe un desfase de 30° entre las tensiones de línea a línea y de línea a neutro más próxima.

Las tensiones entre línea y línea de los primarios y secundarios correspondientes en un banco estrella-estrella, están casi en concordancia de fase. Por tanto, la conexión en estrella será particularmente adecuada para devanados de alta tensión, en los que el aislamiento es el problema principal, ya que para una tensión de línea determinada las tensiones de fase de la estrella sólo serían iguales al producto $1/1.7320508$ por las tensiones en el triángulo.



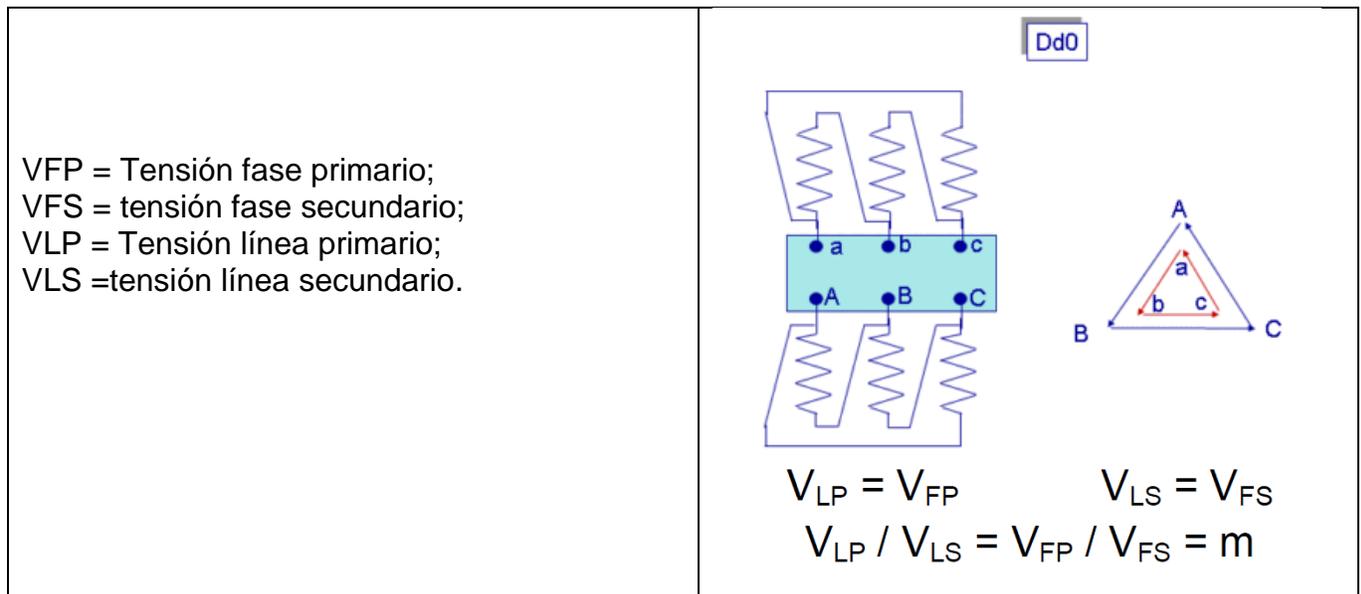
ÍNDICE HORARIO:

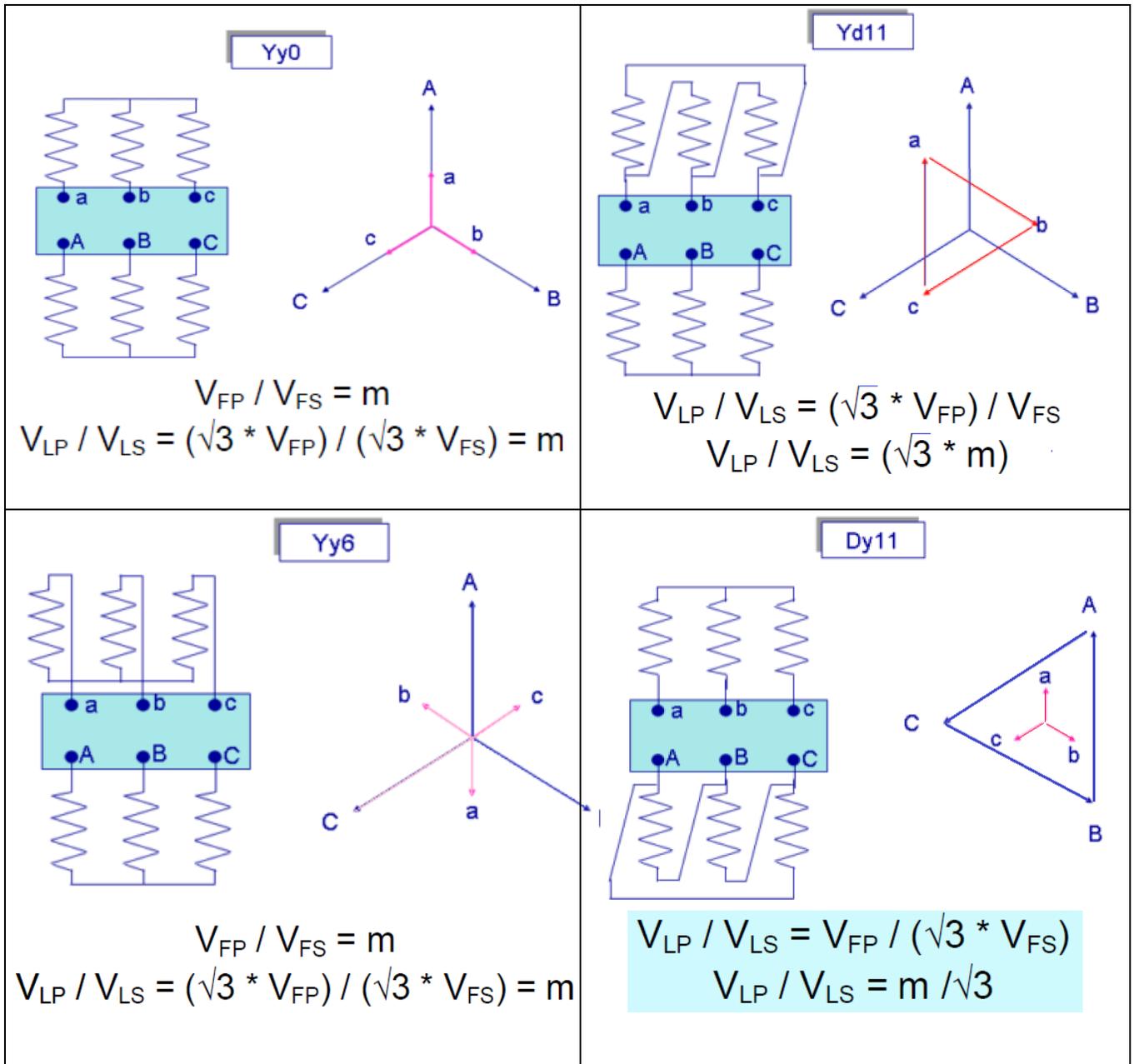
Todos los arrollamientos montados sobre una misma columna abrazan en cada instante el mismo flujo común y con el fin de precisar el sentido de las f.e.m. suponemos que el sentido de arrollamiento de las bobinas primarias y secundarias es el mismo. Si designamos con la misma letra los terminales homólogos en cuanto a polaridad instantánea de dos cualquiera de estos arrollamientos montados sobre la misma columna, los vectores representativos de las f.e.m. respectivos se presentaran como se indica a continuación.

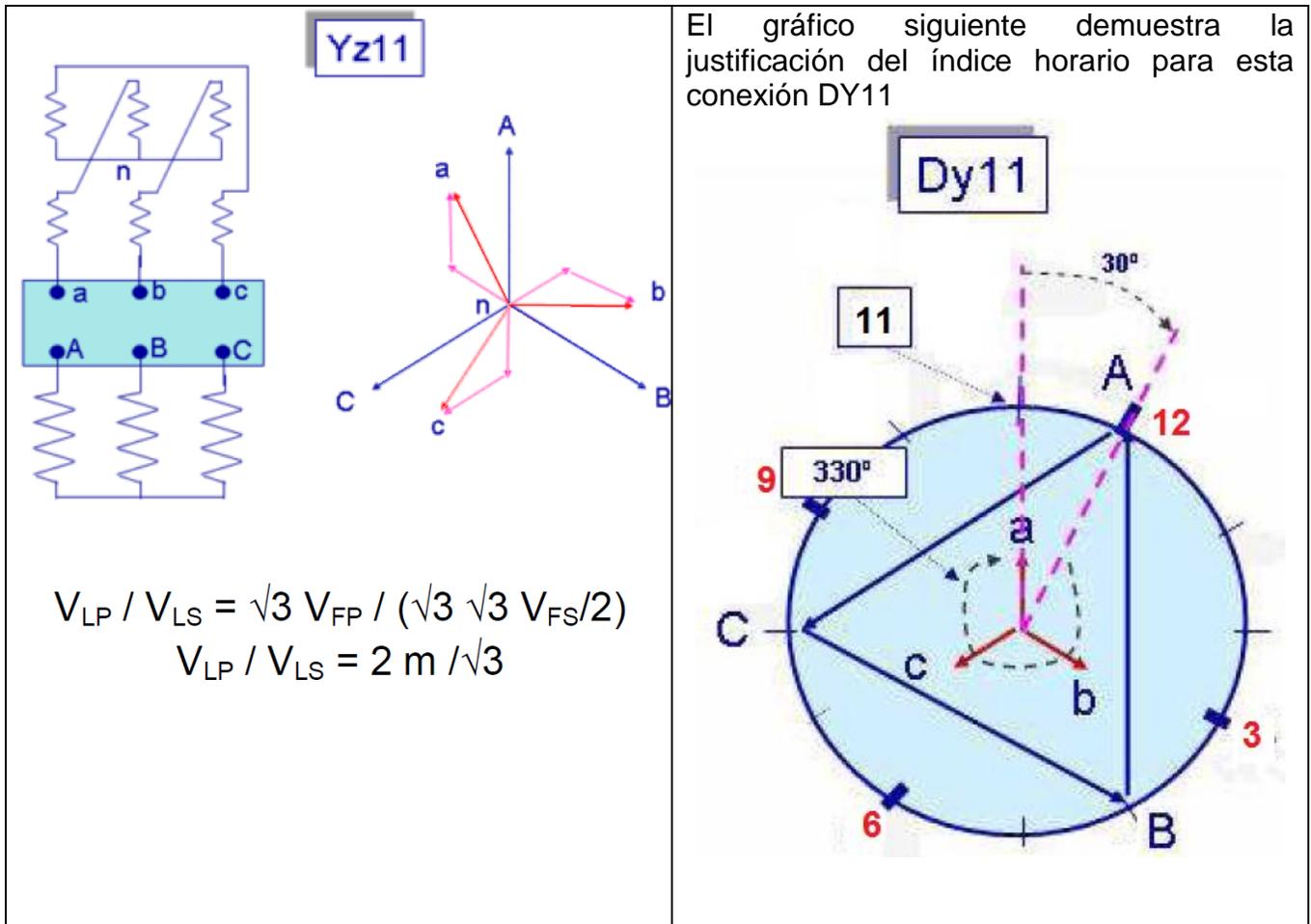
Dependiendo del tipo de conexión, las tensiones simples del primario y del secundario pueden no estar en fase, cosa que siempre ocurre en los transformadores monofásicos. Para indicar el desfase existente entre las tensiones simples, se suele utilizar el llamado índice horario, expresado en múltiplos de 30° .

El conocimiento del desfase (índice horario) es muy importante cuando se han de conectar transformadores en paralelo, dado que entonces, todos los transformadores deben tener el mismo índice horario, para evitar que puedan producirse corrientes de circulación entre los transformadores cuando se realice la conexión.

A continuación veremos algunas de las formas más frecuentes de conexión:







En un transformador ya construido, cambia la alimentación de un lado a otro, cambia el desfase de la máquina. Ejemplo: Dy11 pasa a Yd1. Se comparan fases, la U con la u. Los tipos de conexiones usados son 12, que son las que más se utilizan y figuran en la placa de la máquina. Los grupos más usuales son cuatro 0; 6; 5 y 11. Para determinar el grupo de conexión superponen los diagramas vectoriales. Se pueden conectar un grupo 0 con un grupo 6. Ejemplo Yy0 con Yy6.

En alta no hay problema pues las fases U y u están iguales superponiendo los diagramas, pero en baja, cuando encima los diagramas vectoriales y uno los bornes u a las barras de salida, tendremos el doble del potencial de la fase, por ejemplo si cada una tiene 220V, estamos uniendo puntos que difieren en 440V, es decir, unamos se produce el cortocircuito. Entonces, podremos unir un Yy0 con un Dd0 o con un Dz0, pero siempre que sea 0, para que estén los bornes iguales.

Son cuatro grupos y tres conexiones por grupo, como sigue.

CUADRO DE CONEXIONES NORMALES

DEFASAJE	DESIGNACION		DIAGRAMA VECTORIAL	
	L.E.C	V.D.E	ALTA TENSION	BAJA TENSION
0°	Dd0	A1		
	Yy0	A2		
	Dz0	A3		
180°	Dd6	B1		
	Yy6	B2		
	Dz6	B3		

150°	Dy5	C1		
	Yd5	C2		
	Yz5	C3		
-30°	Dy11	D1		
	Yd11	D2		
	Yz11	D3		

CONEXIONES ESPECIALES DE LOS TRANSFORMADORES TRIFÁSICOS

Además de las conexiones usuales de los transformadores trifásicos, existen otras formas para transformar corriente trifásica con solo dos transformadores. Todas las técnicas usadas para esto se basan en la reducción de la capacidad de carga de los transformadores, que puede justificarse por ciertos factores económicos.

Algunas de las principales conexiones de este tipo son:

1. La conexión Δ abierta (o V-V)
2. Conexión Y abierta - Δ abierta
3. Conexión Scott-T
4. Conexión trifásica en T

1.- LA CONEXIÓN Δ ABIERTA (o V - V)

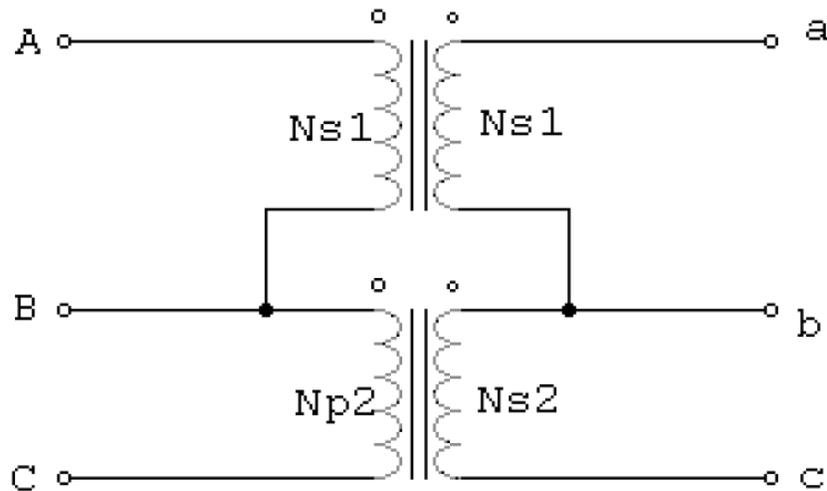


Figura: Conexión en V-V (o Delta abierta)

En ciertas situaciones no puede utilizarse un banco de transformadores completo para realizar una transformación trifásica.

Por ejemplo, supóngase que un banco de transformadores $\Delta - \Delta$ que consta de transformadores separados tiene una fase dañada que se debe retirar para su reparación. Siendo los voltajes secundarios que permanecen $V_A = V \angle 0^\circ$ y $V_B = V \angle -120^\circ$ y V , entonces el voltaje que pasa a través la abertura que dejó el tercer transformador está dado por:

$$V_C = -V_A - V_B$$

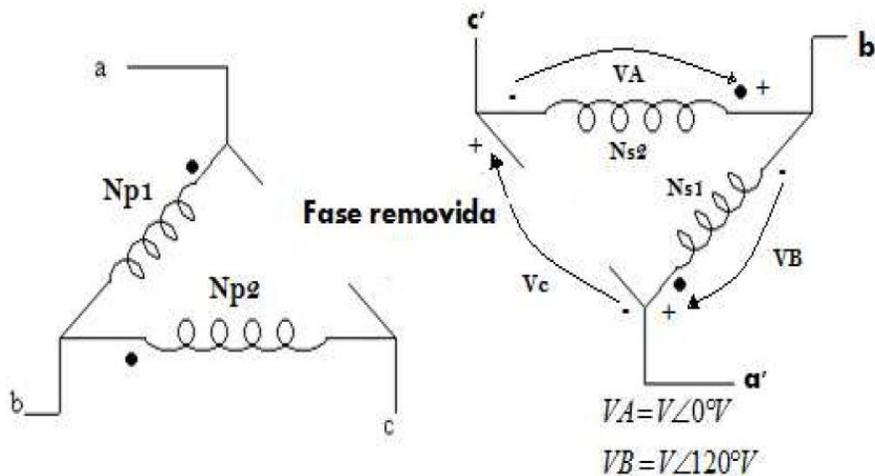
$$V_C = -V \angle 0^\circ - V \angle 120^\circ$$

$$V_C = -V - (0.5V - j0.866V)$$

$$V_C = -0.5V + j0.866V$$

$$V_C = V \angle 120^\circ$$

Éste es el mismo voltaje que estaría presente si el tercer transformador siguiera ahí. A menudo, a la fase C se le llama fase fantasma. Entonces, la conexión delta abierta posibilita que un banco de transformadores siga funcionando con sólo dos de sus transformadores. Permitiendo que fluya cierta potencia aun cuando se haya removido una fase dañada.



Si el voltaje nominal de un transformador en el banco es V_ϕ y la corriente nominal es I_ϕ entonces la potencia máxima que puede suministrar a la carga es:

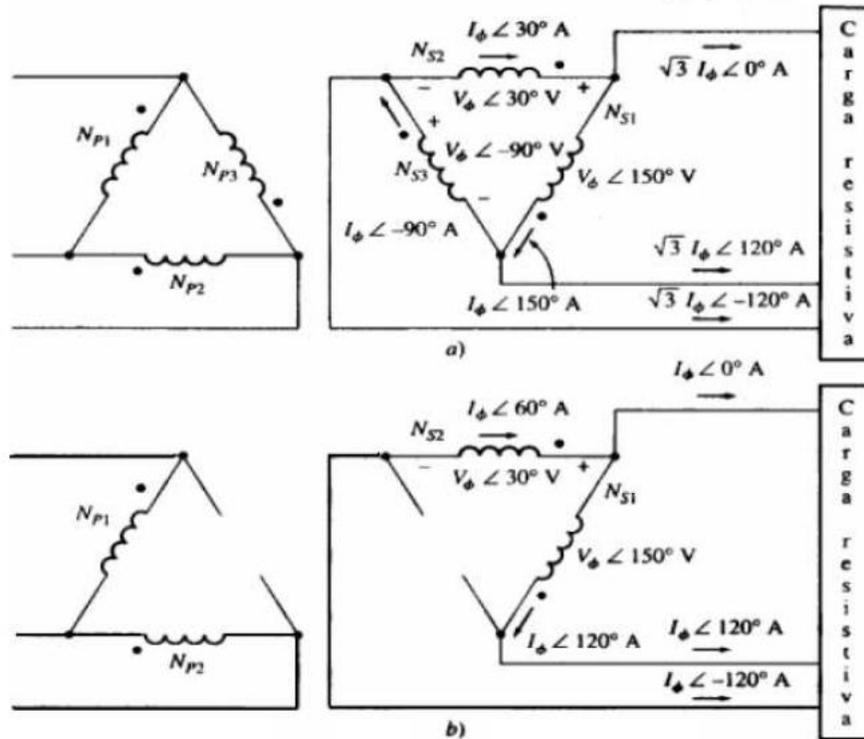
$$P = 3 V_\phi I_\phi \cos\theta$$

El ángulo entre el voltaje V , Y la corriente I , en cada fase es 0° , por lo que la potencia total suministrada por el transformador es:

$$P = 3 V_\phi I_\phi \cos\theta$$

$$P = 3 V_\phi I_\phi$$

En la siguiente figura se muestra un transformador con delta abierta. Debido a que falta una de las fases del transformador, la corriente de línea de transmisión es igual a la corriente de fase en cada transformador y las corrientes y voltajes en el banco del transformador tienen un ángulo que difiere por 30° .



La figura anterior contiene: a) Voltajes y corrientes en un banco de transformador $\Delta - \Delta$. b) Voltajes y corrientes en un banco de Transformador Δ abierta.

Para el transformador 1 el voltaje tiene un ángulo de 150° y la corriente tiene un ángulo de 120° , por lo que la expresión para la potencia máxima en el transformador es:

$$P = 3V_\phi I_\phi \cos(150 - 120)$$

$$P = 3V_\phi I_\phi \cos(30)$$

$$P = \frac{\sqrt{3}}{2} V_\phi I_\phi$$

Para el transformador 2, el voltaje tiene un ángulo de 30° y la corriente tiene un ángulo de 60° , por lo que la potencia máxima es:

$$P_2 = 3V_\phi I_\phi \cos(30 - 60)$$

$$P_2 = 3V_\phi I_\phi \cos(-30)$$

$$P_2 = \frac{\sqrt{3}}{2} V_\phi I_\phi$$

Por lo tanto, la potencia máxima total para el banco delta abierta está dada por:

$$P_2 = \frac{\sqrt{3}}{2} V_{\phi} I_{\phi}$$

La corriente nominal es la misma en cada transformador, sin importar si son dos o tres, y el voltaje es el mismo en cada transformador; por lo que la razón entre la potencia de salida disponible del banco delta abierta y la potencia disponible del banco trifásico normal es:

$$\frac{P_{abierta\Delta}}{P_{3fase}} = \frac{\sqrt{3}V_{\phi}I_{\phi}}{3V_{\phi}I_{\phi}} = \frac{1}{\sqrt{3}} = 0.577$$

La potencia disponible que sale del banco delta abierta es sólo 57.7% del valor nominal del banco original.

¿Qué pasa con el resto del valor nominal del banco delta abierta?

Después de todo, la potencia total que los dos generadores juntos pueden producir equivale a dos tercios del valor nominal del banco original.

Para encontrar la respuesta se debe examinar la potencia reactiva del banco delta abierta.

La potencia reactiva del transformador 1 es:

$$Q_1 = 3V_{\phi}I_{\phi} \cos(150 - 120)$$

$$Q_1 = 3V_{\phi}I_{\phi} \cos(30)$$

$$Q_1 = \frac{1}{2} V_{\phi} I_{\phi}$$

La potencia reactiva del transformador 2 es:

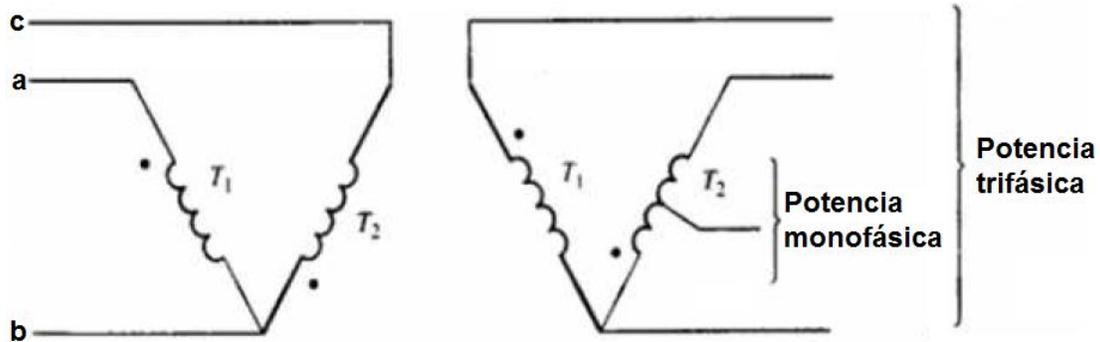
$$Q_2 = 3V_{\phi}I_{\phi} \cos(30 - 60)$$

$$Q_2 = 3V_{\phi}I_{\phi} \cos(-30)$$

$$Q_2 = -\frac{1}{2} V_{\phi} I_{\phi}$$

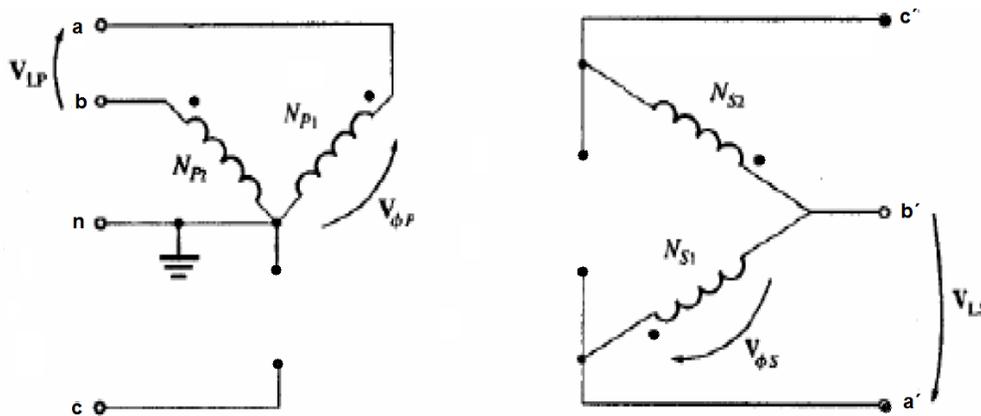
Entonces, un transformador produce potencia reactiva que consume el otro. Este intercambio de energía entre los dos transformadores es lo que limita la potencia de salida a 57.7% del valor nominal del banco original en lugar del esperado 66.7%. Otra manera de ver el valor nominal de la conexión delta abierta es que se puede utilizar 86.6% del valor nominal de los dos transformadores restantes.

Las conexiones delta abierta se utilizan ocasionalmente cuando se desea suministrar una pequeña cantidad de potencia trifásica a una carga monofásica. En tal caso, se puede utilizar la conexión de esta figura, donde el transformador T2 es mucho más grande que el transformador T1.



La utilización de una conexión de transformador en delta abierta para suministrar una pequeña cantidad de potencia trifásica y mucha potencia monofásica.

2.- LA CONEXIÓN Y ABIERTA - Δ ABIERTA.



Esta conexión es muy parecida a la conexión delta abierta excepto en que los voltajes primarios se derivan de dos fases y el neutro.

Se utiliza para dar servicio a pequeños clientes comerciales que necesitan servicio trifásico en áreas rurales donde no están disponibles las tres fases.

Con esta conexión un cliente puede obtener el servicio trifásico provisional basta que la demanda haga necesaria la instalación de la tercera fase.

Una gran desventaja de esta conexión es que debe fluir una corriente de retorno muy grande en el neutro del circuito primario.

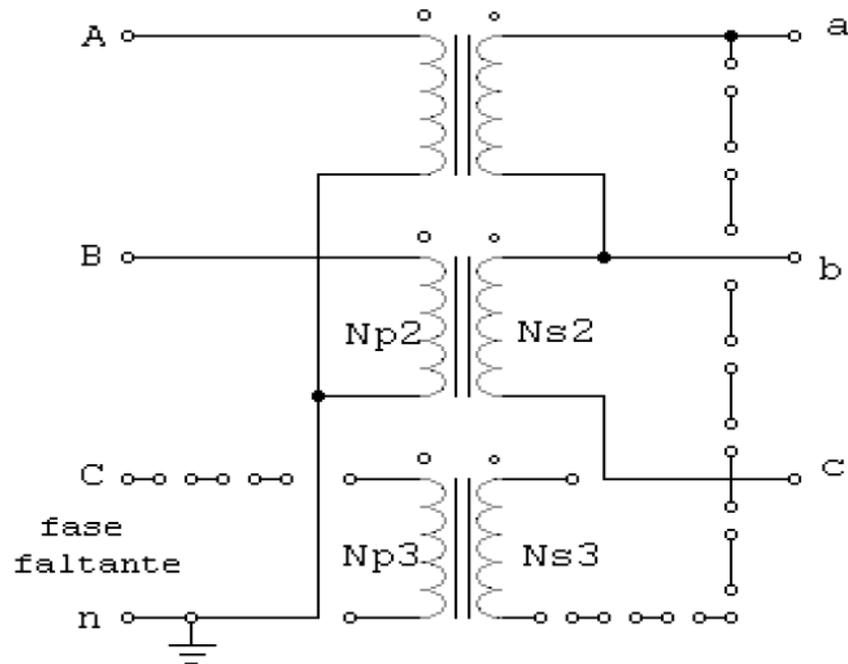


Diagrama de cableado de la transformador Y abierta - Δ abierta

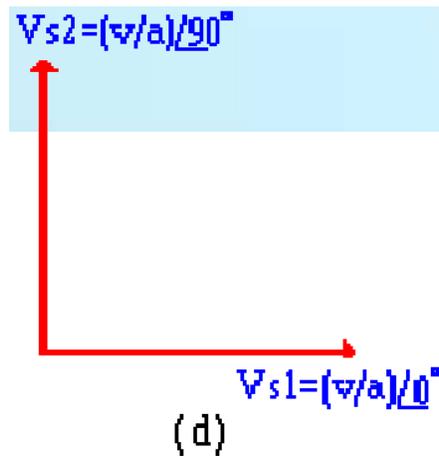
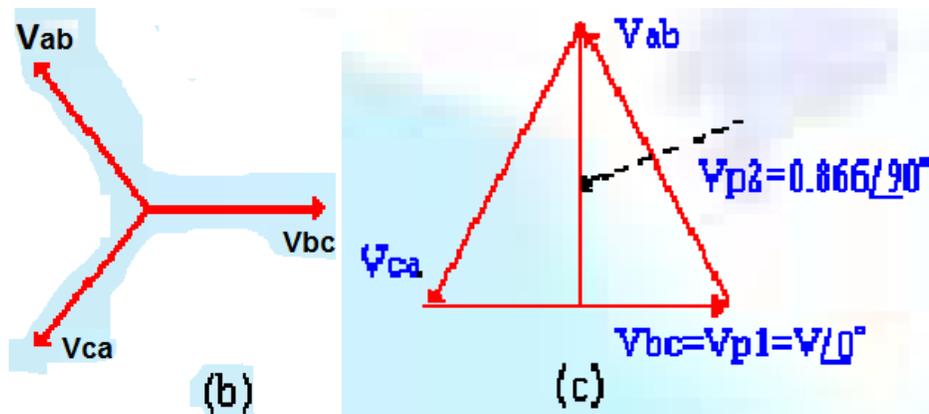
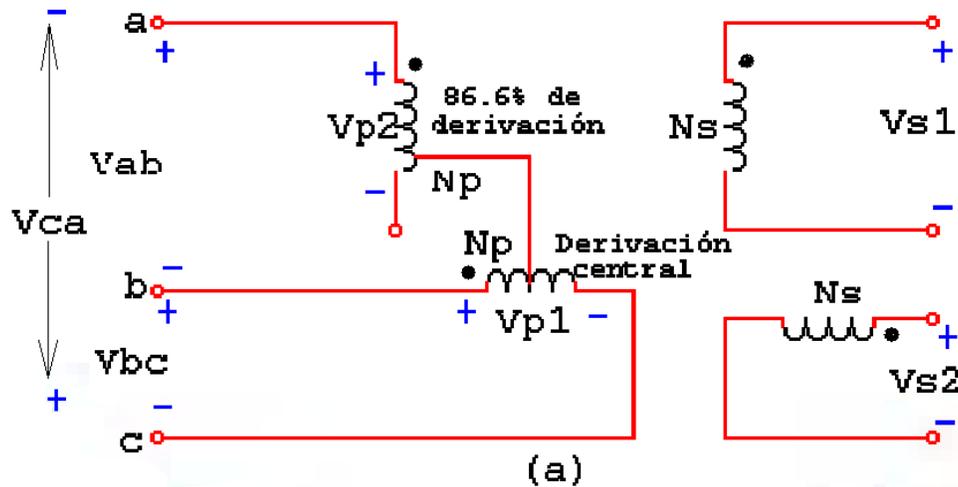
3.- LA CONEXIÓN SCOTT-T:

La conexión Scott-T es una manera de obtener dos fases separadas 90° a partir de un suministro de potencia trifásica, consta de dos transformadores monofásicos con idéntica capacidad.

Uno tiene una toma en su devanado primario a 86.6% de su voltaje a plena carga.

Están conectados como se muestra en la figura a. La toma de 86.6% del transformador T2 está conectada a la toma central del transformador T1.

$$V_{ab} = V \angle 120^\circ V_{bc} = V \angle 0^\circ V_{ca} = V \angle -120^\circ$$



Conexión del transformador Scott-T a) Diagrama de cableado; b) voltajes de entrada trifásicos; c) voltajes en los devanados primarios del transformador; d) voltajes secundarios bifásicos.

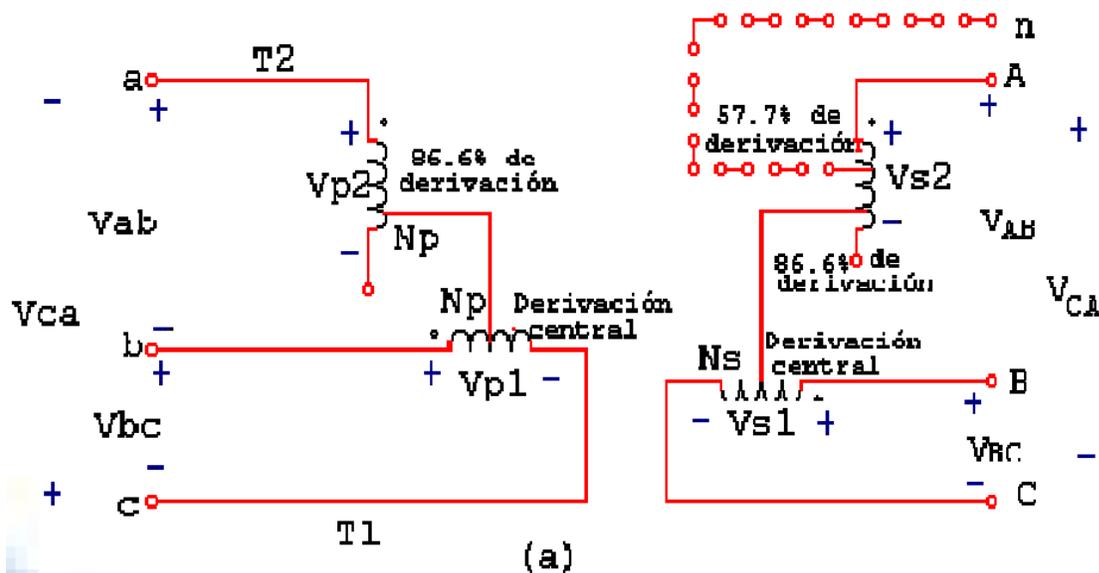
4.- LA CONEXIÓN T TRIFÁSICA:

La conexión Scott-T utiliza dos transformadores para convertir potencia trifásica en potencia bifásica con un nivel diferente de voltaje.

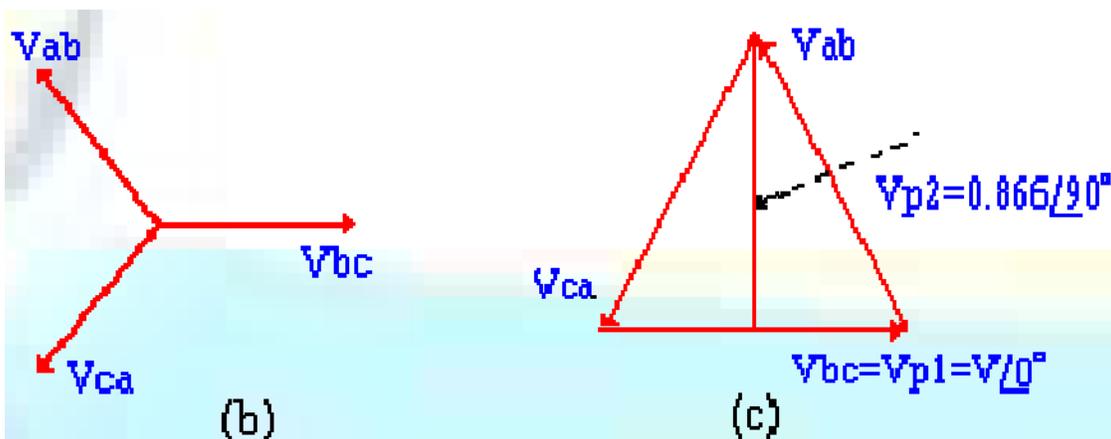
Mediante una sencilla modificación de esta conexión, los mismos dos transformadores pueden convertir potencia trifásica en potencia trifásica con otro nivel de voltaje.

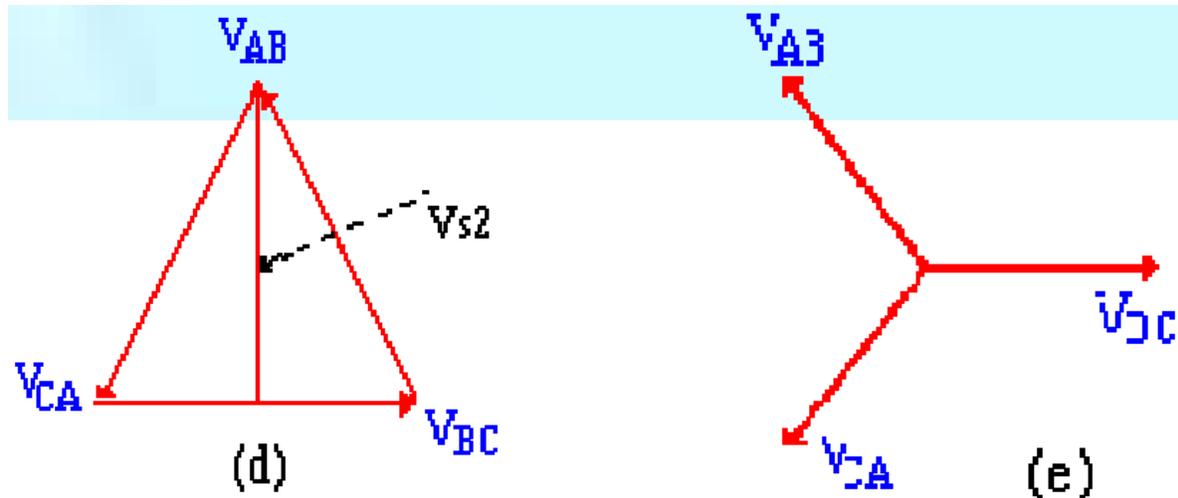
En este caso, tanto el devanado primario como secundario del transformador T2 tienen una toma al 86.6% y las tomas están conectadas a las tomas centrales de los devanados correspondientes del transformador T1.

En esta conexión a T1 se le llama transformador principal y a T2 se le llama transformador de conexión en T.



$$V_{ab} = V \angle 120^\circ V_{bc} = V \angle 0^\circ V_{ca} = V \angle -120^\circ$$





Nota:

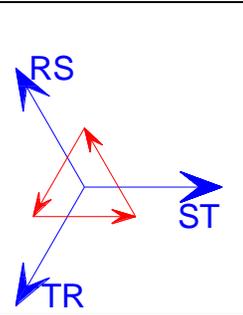
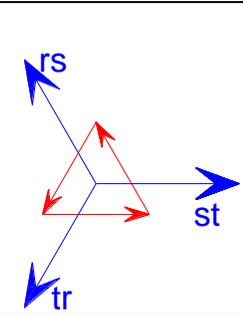
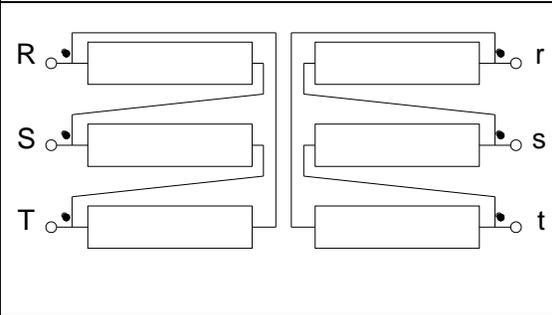
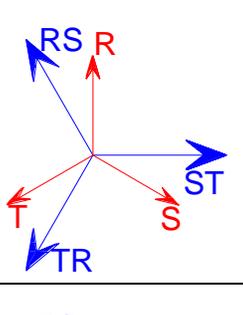
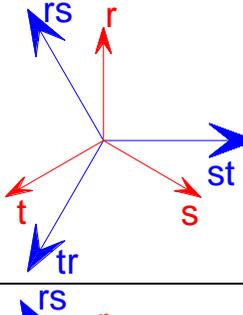
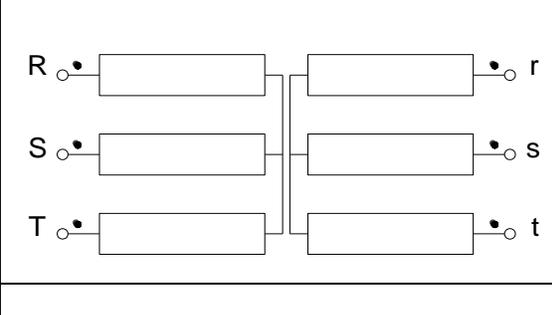
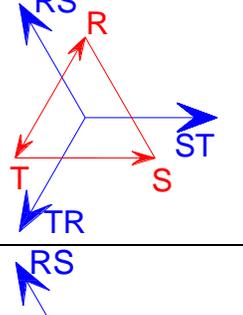
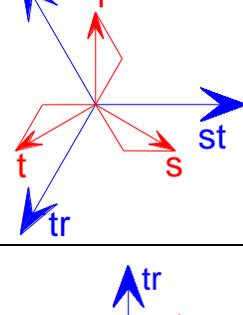
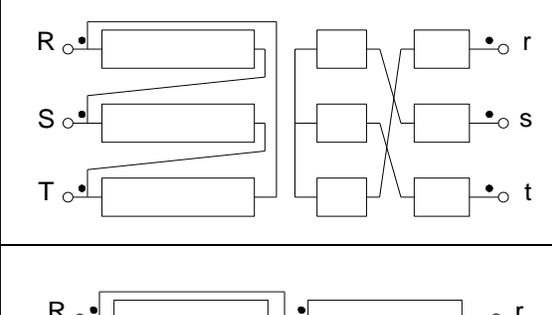
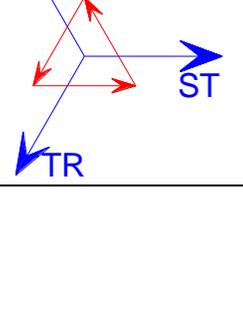
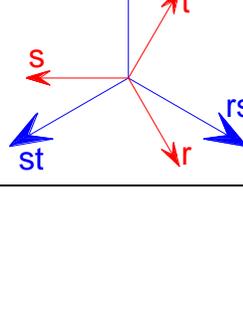
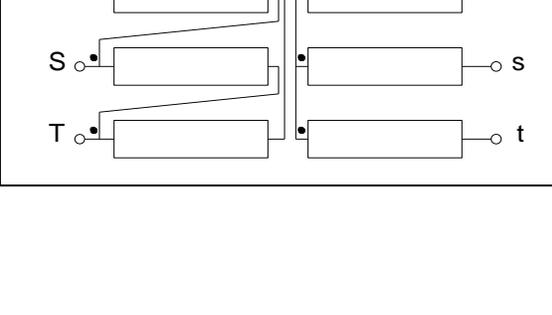
$$V_{AB} = V_{S2} - V_{S1} = (V/a)\angle 120^\circ; \quad V_{BC} = V_{S1} = (V/a)\angle 0^\circ;$$

$$V_{CA} = -V_{S1} - V_{S2} = (V/a)\angle -120^\circ$$

En las figuras anteriores se muestra la Conexión trifásica en T del transformador:

- Diagrama de cableado;
- voltajes de entrada trifásicos;
- voltajes en los devanados primarios del transformador;
- voltajes en los devanados secundarios del transformador;
- voltajes secundarios trifásicos resultantes.

Algunas conexiones importantes que debemos conocer.

INDICE DE DESFASE	SIMBOLO DE ACOPLAMIENTO	DIAGRAMA FASORIAL		ESQUEMA DE CONEXIONES	RELACIONES DE TRANSFORMACION
		ALTA TENSION	BAJA TENSION		
0 (0°)	Dd0				$\frac{N_1}{N_2}$
	Yy0				$\frac{N_1}{N_2}$
	Dz0				$\frac{2N_1}{3N_2}$
5	Dy5				$\frac{1N_1}{\sqrt{3}N_2}$

(150°)	Yd5			$\sqrt{3} \frac{N_1}{N_2}$
	Yz5			$\frac{2N_1}{\sqrt{3}N_2}$

CONEXIÓN DE TRANSFORMADORES TRIFÁSICOS EN PARALELO

La conexión de transformadores en paralelo se hace necesaria debido a los incrementos de la demanda que superan la capacidad existente o cuando los requerimientos de confiabilidad y continuidad de operación lo exigen, este es el caso, que si un transformador falla, el otro continuará alimentando la carga sin interrupción. Cuando la demanda de energía se reduce temporalmente, resulta más económico operar un transformador pequeño cerca de su límite de capacidad a plena carga que un transformador mayor a capacidad reducida.

Por lo que, cuando la demanda energética es muy fluctuante resulta más provechoso la instalación de dos o más transformadores en paralelo que utilizar un transformador de gran capacidad. En estas condiciones el sistema es más flexible porque tiene la posibilidad de agregar una parte de los transformadores en paralelo cuando sea necesario. Dos transformadores trifásicos operarán en paralelo si tienen el mismo arreglo en los devanados (por ejemplo, Y-delta), están conectados con la misma polaridad, tienen la misma rotación de fase y su desplazamiento angular es el mismo. Para conectar dos transformadores en paralelo, los diagramas de tensión deben, coincidir.

Por supuesto, es necesario que los dos transformadores tengan impedancia, capacidad nominal y frecuencia similares. La división de la corriente de carga, en proporción a las capacidades de KVA de los transformadores en paralelo está determinada por la igualdad de sus voltajes nominales, relación de vueltas en los devanados, porcentaje de impedancias y relaciones de su reactancia a su resistencia.

Si estas condiciones no se cumplen, las corrientes de carga no se pueden dividir proporcionalmente en las capacidades nominales de KVA de los transformadores, y puede surgir una diferencia de fase entre las corrientes. Para simplificar la conexión de los transformadores en paralelo y evitar la necesidad de pruebas de polaridad, rotación de fase, etc., el ANSI en su norma C 57. 12. 70-1964 (R-1971) uniforma las marcas y la conexión para transformadores de distribución y potencia.

Los transformadores marcados según tal norma, pueden operar en paralelo por la simple conexión de terminales numeradas igualmente. Por supuesto, esto es aplicable a los transformadores que tienen características similares como la relación de vueltas, impedancia, desplazamiento angular, etc.

Cuando tenemos un transformador conectado a barras, alimentando un cierto receptor, por ejemplo de 50 KVA, y la demanda de este receptor aumenta a 100KVA, necesitamos instalar otro transformador de 50 KVA. Este se conecta en paralelo con el anterior y ahora la potencia es suficiente para alimentar esa demanda del receptor. Se unen primarios a las barras de alimentación, y se unen secundarios a las barras de distribución o salida, pero, para poder hacer esta conexión en paralelo se deben cumplir ciertas condiciones:

1. Igualdad de tensiones y relación de transformación.
2. Igualdad de desfase de los diagramas vectoriales (secundario respecto al primario).
3. Igualdad de secuencia.
4. Igualdad de tensiones de cortocircuito.
5. Una cierta relación de potencia.

Entonces, cumpliéndose estas cinco condiciones, se pueden conectar en paralelo dos o más transformadores.

Análisis de cada Condición:

1. Igualdad de Tensiones y relación de transformación.

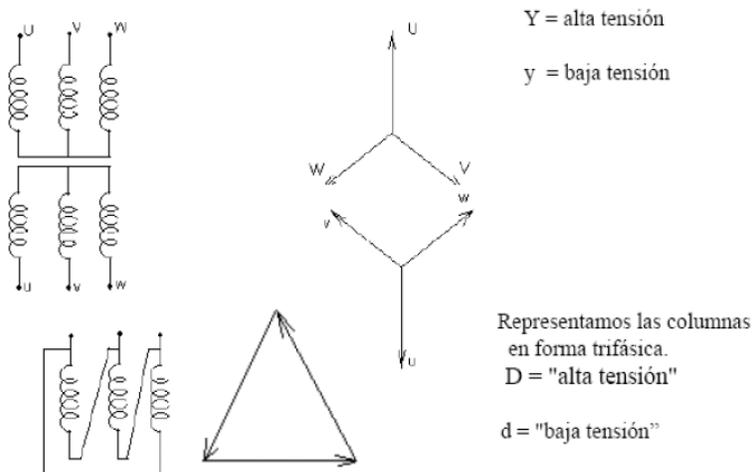
Por estar unidos primarios y secundarios es lógico que las tensiones primarias y secundarias deben ser iguales, pues sino un transformador le enviaría corriente al otro. No basta con que la relación sea igual, deben ser también iguales las tensiones. Por ejemplo: 1000/100 y 100/10. Tengo igual relación pero no puedo conectar un primario de 1000V con otro de 100V.

Igualdad de tensiones primarias y secundarias implica igual relación pero igual relación no implica iguales tensiones primarias y secundarias. De no cumplirse esta condición aparecen corrientes circulantes entre las máquinas, ya en vacío. No es conveniente que estas superen el 10% de las nominales.

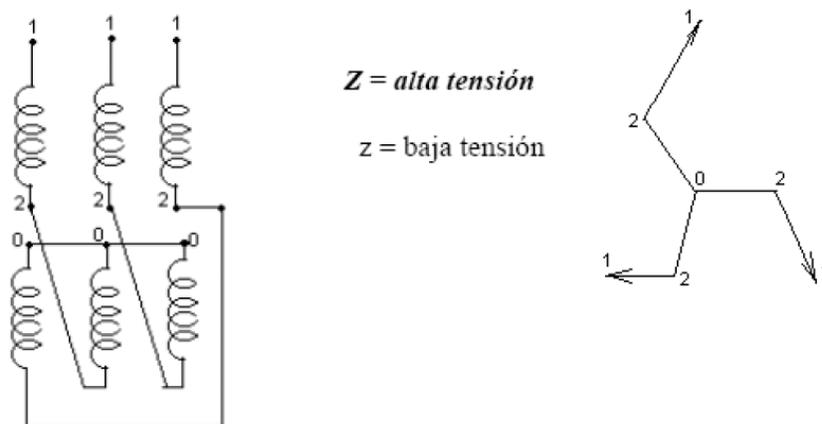
2. Igual desfase de diagramas vectoriales (secundario respecto del primario):

La condición fundamental para que puedan funcionar los transformadores en paralelo, es que los terminales a empalmar entre si se hallen en todo momento al mismo potencial.

Hemos visto conexión triángulo, estrella y veamos la Zig-Zag pero antes interpretemos las conexiones y sus diagramas vectoriales correspondientes.



Si a este último bobinado, lo dividimos en dos partes tenemos la conexión Zig-Zag.



3. Secuencia o sentido de rotación de las fases Secundarias:

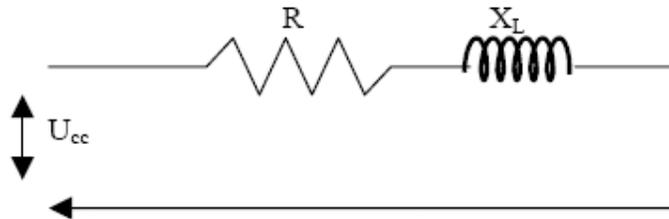
La secuencia de fases se llama al orden de rotación de los vectores. Es la sucesión en el tiempo, de los máximos de los parámetros eléctricos tensión o intensidad, en las tres fases de un sistema. A ella corresponde un sentido de rotación del diagrama vectorial.

Los transformadores cuya secuencia sea opuesta, es decir tengan sentido de giro de los diagramas vectoriales opuesto no pueden conectarse en paralelo, porque en un determinado instante van a coincidir los vectores de tensión secundaria pero, aun siendo del mismo grupo de conexión, en el instante siguiente los

vectores comienzan a desplazarse y aparecen diferencias de potencial entre las fases homólogas.

Entonces, para poner en paralelo, los transformadores deben tener diagramas vectoriales que giren en igual sentido. Todo depende de las conexiones internas del transformador. Observemos un motor eléctrico trifásico, según el orden de conexiones a las líneas ABC o RST en nuestro país es el sentido de giro, si permutamos dos fases el giro es en sentido contrario.

4. Igualdad de tensiones de Cortocircuito:



La tensión de cortocircuito sirve entre otras cosas para determinar la impedancia de la máquina, ya que:

$$Z_{cc} = U_{cc} / I_{cc}$$

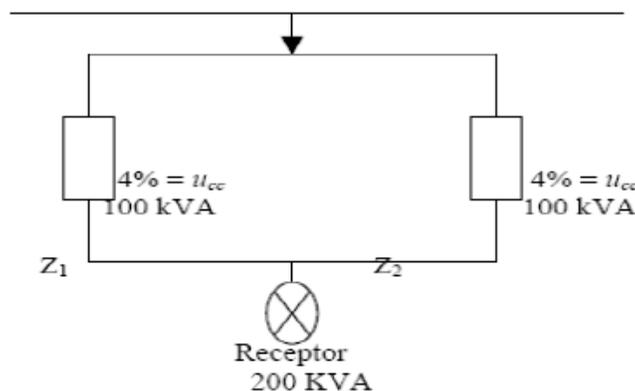
Dónde:

R = Resistencia total referida

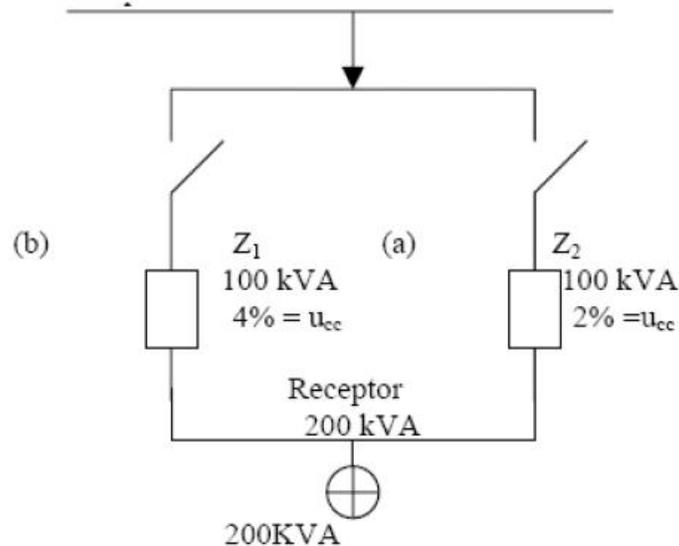
X_L = reactancia total referida

$$Z_{cc} = U_{cc} / I_n$$

La I_n se obtiene de la máquina y la UCC figura en placa, luego se conoce la impedancia de la máquina. Dos transformadores en paralelo en esquema unifilar serían como dos impedancias en paralelo respecto de la carga. La corriente que viene de la red y que pide el receptor se distribuye según los valores de las impedancias internas, si son iguales, cada transformador aporta la misma potencia de 100 KVA cada uno que pide la carga.



Pero si son distintas, pasará más corriente por la más chica, en el ejemplo (abajo), a de 2%, saltan los fusibles protectores (a) y al quedar solo con un transformador de 100 kVA y la carga pidiendo 200 kVA, también saltan las protecciones y quedan las dos máquinas fuera de servicio.



Es decir, tenemos suficiente potencia instalada en los transformadores para abastecer el receptor y no podemos alimentarlo porque nos saltan las protecciones debido a la sobrecarga que sufre la máquina de menor impedancia.

5. Cierta relación de Potencia:

Condición íntimamente ligada a la anterior. Resulta que según la potencia de la máquina es la $u_{cc}\%$ que tiene, a mayor potencia mayor $u_{cc}\%$, tiene más resistencia (mas alambre), es más grande, mayor dimensión física, por consiguiente, más L, luego aumenta Z, aumenta u_{cc} , es decir, la $u_{cc}\% = f(P)$ y $u_{cc}\% \text{ Pot}$.

Si graficáramos $u_{cc}\% = f(\text{pot})$ es una curva creciente. Luego podré poner en paralelo máquinas cuyas $u_{cc}\%$ difieran sólo en un 10 % y no más. En una gama de potencias, una regla práctica es que la relación de potencia sea 1:3.

Es decir si debo alimentar 200 kVA podré poner en paralelo uno de 50 kVA y en la condición límite otro de 150 kVA, en servicio transitorio.

En las industrias, como en las Empresas Eléctricas, con frecuencia es necesario conectar bancos de transformadores en paralelo. Sin embargo, es conocido que para que ninguno de los componentes del nuevo banco se sobrecargue con su correspondiente calentamiento y envejecimiento prematuro, es conveniente seguir ciertos lineamientos con respecto de las características de cada transformador.

En este escrito primero enunciaremos todas las condiciones necesarias para que en el caso ideal, la conexión fuera satisfactoria. Después analizaremos específicamente las condiciones de desplazamiento angular e impedancia, con algunos ejemplos.

Palabras clave: Transformadores en paralelo. Desfasamiento angular, Conexiones de transformadores.

CONDICIONES NECESARIAS IDEALES PARA LA CONEXIÓN DE TRANSFORMADORES EN PARALELO.

La regla clásica ideal para el paralelo de transformadores, es la de cumplir con los siguientes requisitos:

- 1.- Igual capacidad (con enfriamiento o sin enfriamiento) de devanados.
- 2.- Igual impedancia (referida a la misma base de voltaje y capacidad).
- 3.- Iguales voltajes lado alimentación y lado carga.
- 4.- Igual relación de transformación en vacío.
- 5.- Igual tipo de enfriamiento.
- 6.- Diseño para igual altura de operación sobre el nivel del mar.
- 7.- Que sean de la misma marca
- 8.- Igual lote de fabricación.
- 9.- Igual tipo de aislamiento (igual temperatura de operación).
- 10.- Similar tiempo de uso (si son usados).
- 11.- Iguales niveles de impulso (NBI).
- 12.- Igual frecuencia.
- 13.- Igual rotación de fases.
- 14.- Igual polaridad.
- 15.- Igual desplazamiento angular.
- 16.- Similar valor de Megaohms de sus aislamientos.

17.- Similar factor de potencia de sus aislamientos.

18.- Similar propiedad Físico-Química de aceites.

19.- Similar valor de Hi-Pot de sus aislamientos.

20.- Similar corriente de excitación.

21.- Similar resistencia de núcleo aterrizado.

22.- Similar corriente de excitación.

Para transformadores monofásicos, sólo se tomarán las que correspondan a sistemas monofásicos.

Nota:

En la práctica, como ustedes saben, no se toman en cuenta todas las características mencionadas anteriormente, pero sí las más significativas.

Dentro de estas últimas, se analizarán sólo tres, que algunas veces es necesario reconsiderar, principalmente cuando aparecen las inoportunas emergencias, que casi a todos se nos han presentado en nuestro trabajo.

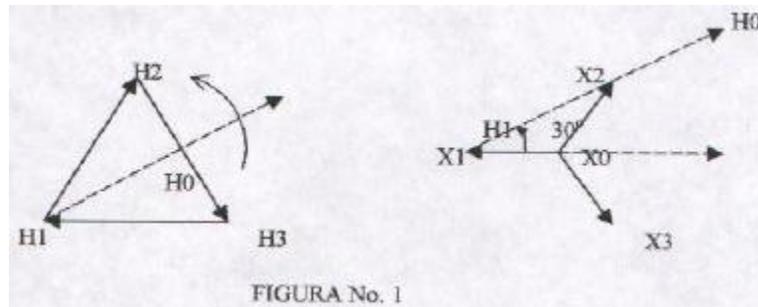
- **DESPLAZAMIENTO ANGULAR**

Es el ángulo de tiempo entre voltajes primarios y secundarios de referencia de un sistema trifásico.

El ANSI establece que en un sistema delta-estrella (Alta y Baja Tensión) el sistema de alta tensión, está adelantado 30 grados con respecto al sistema de baja tensión. La medición de este ángulo, que es el desplazamiento angular, puede hacerse de dos maneras:

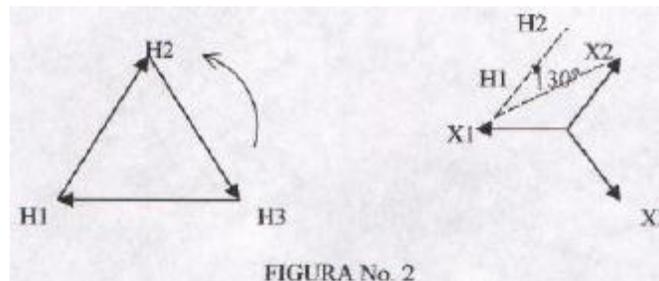
1.- Se trazan la recta que une la polaridad H1 de alta tensión con su neutro correspondiente y la recta que une la polaridad X1 con su neutro correspondiente (llamadas líneas de angularidad primaria y secundaria). Respectivamente, se unen las terminales H1 y X1 y se mide el ángulo formado por las líneas de angularidad en dicho vértice en el sentido contrario a las manecillas del reloj, partiendo de la línea de angularidad de baja tensión hasta la línea de angularidad de alta tensión. En la Figura N°.

1 se indica lo anterior para el caso de una conexión delta-estrella.



Nota.- Para facilidad se recomienda poner al final de las líneas de angularidad, una flecha, para indicar la dirección del vector y así poder medir el ángulo sin cometer errores.

1. Tomando como base los voltajes de línea en alta y baja tensión y midiendo el ángulo en el vértice como en el caso anterior. En la Figura No. 2 aparece este caso para la misma conexión anterior.



En ambos casos, midiendo el ángulo en la dirección contraria a las manecillas del reloj, se tiene el devanado de alta tensión adelante 30 grados con respecto al devanado de baja tensión.

Aplicando el principio anterior y observando los diagramas vectoriales (figura No. 3) de las conexiones de transformadores ya conocidas se establece lo siguiente:

REGLAS PARA EL ACOPLAMIENTO EN PARALELO DE TRANSFORMADORES TRIFÁSICOS

Las combinaciones primario-secundarias reunidas bajo el mismo grupo dan un ángulo igual entre la f.e.m. de línea de uno y otro lado respectivamente, y pueden acoplarse en paralelo sin más que unir entre sí las terminales designadas con la misma inicial. Así, A1, A2, A3 pueden conectarse en paralelo; B1, B2, y B3 también; C1, C2, y C3 igualmente, y, por último D1, D2, y D3.

En cambio, las combinaciones pertenecientes a dos grupos distintos son incompatibles en principio:

A1 no puede acoplarse con D1 o D2, o con C1 o C2, etc., porque, existiendo coincidencia de fases primarias, no puede haberla entre las secundarias.

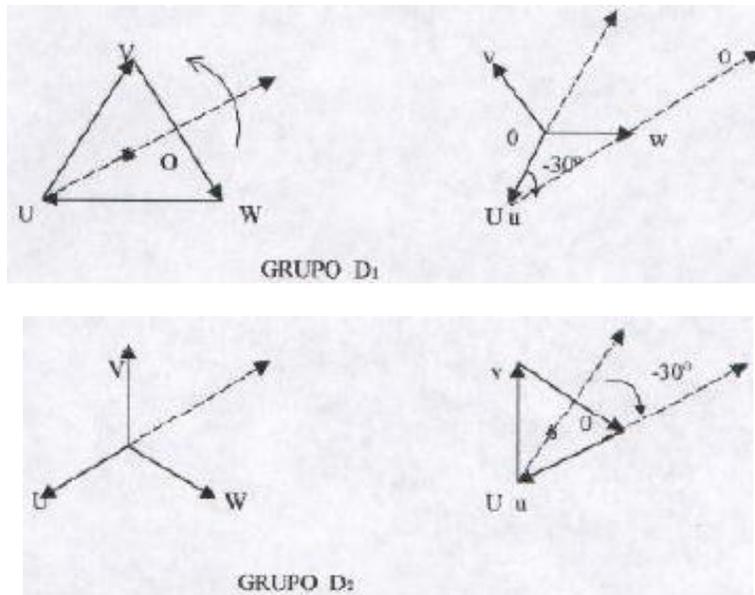
Como puede observarse sí se pueden paralelar los transformadores de un mismo grupo.

Podemos comprobar el paralelaje entre el transformador D1 con el D2.

Identificación		Diagrama		Esquema		Relación de tensiones componentes $\frac{U_{AT}}{U_{BT}}$	Arreglo diagrama V.D.E.
Desfase (Ang. de la BT en retraso)	Denominación C.E.I.	AT	BT	AT	BT		
0°	Dd0					$\frac{N_A}{N_B}$	A1
	Yy0					$\frac{N_A}{N_B}$	A2
	Dz0					$\frac{2N_A}{3N_B}$	A3
150°	Dy5					$\frac{N_A}{\sqrt{3}N_B}$	C1
	Yd5					$\frac{\sqrt{3}N_A}{N_B}$	C2
	Yz5					$\frac{2N_A}{\sqrt{3}N_B}$	C3
100°	Dd6					$\frac{N_A}{N_B}$	B1
	Yy6					$\frac{N_A}{N_B}$	B2
	Dz6					$\frac{2N_A}{3N_B}$	B3
-30°	Dy11					$\frac{N_A}{\sqrt{3}N_B}$	D1
	Yd11					$\frac{\sqrt{3}N_A}{N_B}$	D2
	Yz11					$\frac{2N_A}{\sqrt{3}N_B}$	D3

(*) U_{AT} - Tensión de línea en alta.
 U_{BT} - Tensión de línea en baja.
 N_A - Espiras por fase en alta.
 N_B - Espiras por fase en baja.

Figura N° 3.



Como puede observarse los dos transformadores tienen el mismo desplazamiento angular y por lo tanto pueden paralelarse uniendo sus terminales correspondientes (ver figura No. 4)

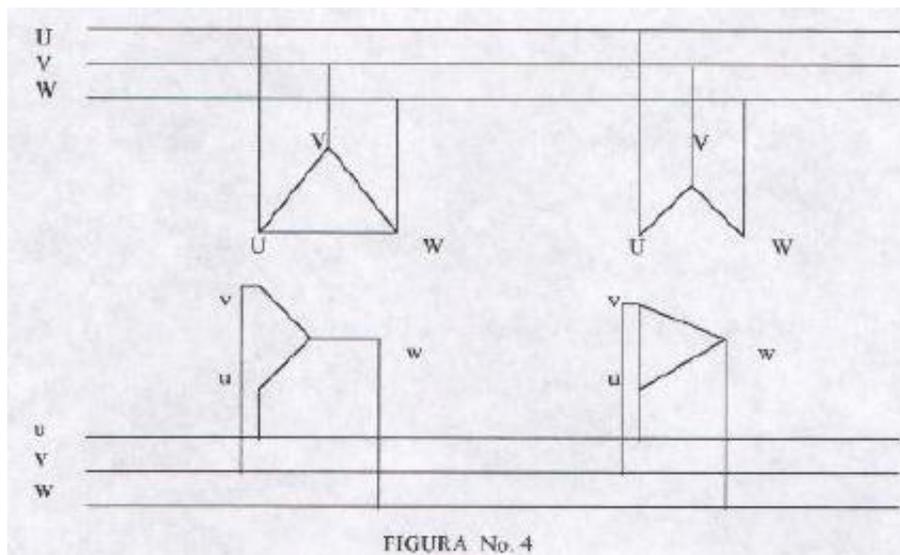


FIGURA No. 4

De esta manera se pueden comprobar que todos los demás grupos indicados en la Figura No. 3 pueden ser paralelados ya que tienen los mismos desplazamientos angulares.

Mediante un análisis vectorial se puede demostrar que algunos transformadores de un grupo se pueden paralelar con los de otro grupo, aunque aparentemente no es posible su acoplamiento. Esto se realiza efectuando giros vectoriales tanto en el lado primario como en el lado secundario.

- **CAPACIDAD E IMPEDANCIA**

Dos o más transformadores se pueden paralelar siempre y cuando sus impedancias sean, en cierta proporción, inversamente proporcionales a sus capacidades y cuando la carga total a alimentar, no sobrepase la suma de los KVA que puede proporcionar dicho acoplamiento.

Las fórmulas básicas para conectar en paralelo dos o más transformadores son las siguientes:

$$(1) \quad St = \frac{Sg}{Zg} \quad \text{o bien:}$$

$$St = \frac{S1}{Z1} + \frac{S2}{Z2} + \frac{S3}{Z3} + \dots \quad \text{en KVA, en donde:}$$

St: es la potencia en KVA del grupo, a tensión del cortocircuito unitario en KVA.

Sg: es la suma de las capacidades del grupo, en KVA.

Zg: Es la impedancia del grupo de transformadores en por ciento.

S1, S2, S3... es la capacidad del banco 1, del bando 2, del banco 3, etc., en KVA.

Z1, Z2, Z3... es la impedancia del transformador 1, del transformador 2, del transformador 3, etc., en por ciento.

En el caso particular de 2 transformadores también se usan las siguientes formulas:

$$(2) \quad \frac{S1}{S2} = \frac{Z2}{Z1} = \frac{x}{y}$$

(3) $x + y =$ Carga total conectada al acoplamiento en KVA, en que:

S1 es la capacidad en KVA del banco 1.

S2 es la capacidad en KVA del banco 2.

Z1 es la impedancia del banco 1 en por ciento.

Z2 es la impedancia en % del banco 2 en por ciento.

x es la capacidad que puede proporcionar el banco 1, en KVA

y es la capacidad que puede proporcionar el banco 2, en KVA.

Veamos en los siguientes ejemplos como afectan las distintas capacidades e impedancias en los paralelos de transformadores.

CASO A

T1 = 1000 KVA.	T2 = 500 KVA.
Z1 = 4 %	Z2 = 10 %
55° de sobre temperatura	55° de sobre temperatura

Aplicando fórmulas para el caso particular de 2 transformadores en paralelo tenemos:

$$\text{De (2)} \frac{1000}{500} \times \frac{10}{4} = \frac{x}{y}; \quad \frac{x}{y} = 5 \quad \text{de donde: } x = 5y$$

De (3) Si X = 1000 KVA y = 500 KVA, debemos tener:

$$\begin{aligned} x + y &= 1500 \text{ KVA.} \\ 6y &= 1500. \\ y &= 250. \\ x &= 1250. \end{aligned}$$

Como el T1 se sobrecarga 250 KVA, consideraremos una carga de $x = 1000$, que es su máxima capacidad. Por lo tanto::

$$\frac{1000}{y} = 5$$

$$y = 200 \text{ KVA.}$$

De esta manera la carga segura combinada, con el objeto de que el transformador T1 no exceda de temperatura sería de: $1000 + 200 = 1200 \text{ KVA.}$

Supongamos ahora el caso inverso, o sea que el transformador de menor capacidad es el de menor impedancia.

CASO B

T1 = 1000 KVA.	T2 = 500 KVA.
Z1 = 10 %	Z2 = 4 %
55° de sobre temperatura	55° de sobre temperatura

$$\text{De (2)} \frac{1000}{500} \times \frac{4}{10} = \frac{x}{y} \quad \text{o bien} \quad \frac{x}{y} = \frac{4}{5} \quad \text{de donde } x = 0.8 y$$

De (3) $x + y = 155 \text{ KVA,}$ sustituyendo:

$$\begin{aligned} 1.8 y &= 1500 \text{ KVA.} \\ y &= 833.33 \text{ KVA.} \\ x &= 666.67 \text{ KVA.} \end{aligned}$$

Como el T2 se sobre carga 333.33 KVA consideraremos $y = 500 \text{ KVA}$ que es la capacidad máxima del T2. Luego:

$$\frac{x}{500} \cdot 0.8$$

$$x = 400 \text{ KVA.}$$

La carga combinada segura en este caso con objeto de que T2 no se sobrecargue sólo es de: $500 + 400 = 900 \text{ KVA}$. Obsérvese que esta capacidad es menor de la que el banco T1 y que este paralelo no es muy conveniente.

A este respecto supongamos que en el ejemplo (CASO A) por alguna circunstancia la carga aumenta hasta un total de 1500 KVA .

En este caso el T1 de 1000 KVA se sobrecargaría en un 25% proporcionando 1250 KVA mientras que el transformador T2 de 500 KVA sólo tomaría 250 KVA .

Como puede verse esta distribución de cargas es favorable y podría usarse por periodos de tiempo cortos sin peligro.

En cambio en el ejemplo (B) si aplicáramos una carga de 1500 KVA , el caso sería extremadamente peligroso para el transformador de 500 KVA ya que éste tendería a tomar 833 KVA , mientras que el de 1000 KVA apenas tomaría los restantes 667 KVA .

Analicemos el siguiente ejemplo.

Se tienen 3 transformadores, T1, T2 y T3 que se quieren conectar en paralelo, cuyas características son:

T1 de 100 KVA , $Z_1 = 4 \%$

T2 de 200 KVA , $Z_2 = 5 \%$

T3 de 300 KVA , $Z_3 = 6 \%$

¿Qué carga en KVA dará en cada transformador si se acoplan en paralelo?

$$\text{De (1) } St = \frac{100}{4} + \frac{200}{5} + \frac{300}{6} \quad \text{o bien} \quad St = 115 \text{ KVA}$$

Considerando la carga total a alimentar igual a la potencia del grupo, la impedancia del grupo es:

$$Z_g = \frac{600}{115} \quad \text{ó} \quad Z_g = 5.22$$

Por lo que:

$$\text{Carga del banco 1: } 100 \times \frac{5.22}{4} = 130.5 \text{ KVA} \quad \text{sobrecarga } 30.5 \text{ KVA}$$

$$\text{Carga del banco 2: } 200 \times \frac{5.22}{5} = 208.8 \text{ KVA} \quad \text{sobrecarga } 8.8 \text{ KVA}$$

$$\text{Carga del banco 3: } 300 \times \frac{5.22}{6} = 261 \text{ KVA} \quad \text{desaprovechado}$$

$$\text{Potencia aproximada del grupo} \quad 600 \text{ KVA.}$$

En caso de emergencia este acoplamiento podría operar en tiempos cortos.

Por último veamos este caso.

Se desean acoplar 2 transformadores, T1 y T2, en paralelo:

$$\begin{aligned} T1 &= 100 \text{ KVA} & T2 &= 1000 \text{ KVA} \\ Z1 &= 4.5 \% & Z2 &= 5.5 \% \end{aligned}$$

$$\text{De (2)} \quad \frac{100}{1000} \times \frac{5.5}{4.5} = \frac{x}{y} \quad \text{de donde } x = 0.122 y$$

$$\text{De (3)} \quad x + y = 1100$$

Si consideramos una carga a alimentar total de 1100 KVA tendremos:

$$1.122 y = 1100$$

$y = 980.39$ KVA carga que proporciona el T2.

$x = 119.61$ KVA carga que proporciona el T1.

Obsérvese que el banco T2 resulta sobre cargado. Considerando $x = 100$ KVA se tendrá:

$$y = \frac{100}{0.122} \quad \text{o bien } y = 819.66 \text{ KVA carga que da el T2}$$

$x = 100$ KVA carga que da el T1

Obsérvese que agregando de 100 KVA al de 1000 KVA se traduce realmente a disponer de una capacidad total de:

$$819.66 + 100 = 919.66 \text{ KVA.}$$

Usando la formula No. 1 se tiene:

$$St = \frac{100}{4.5} + \frac{1000}{5.5}, \quad St = 204.03 \text{ KVA}$$

$$Zg = \frac{1100}{204.03}, \quad Zg = 5.3$$

$$\text{Carga del banco 1: } 100 \times \frac{5.39}{4.5} = 119.77$$

$$\text{Carga del banco 2: } 1000 \times \frac{5.39}{5.5} = 980$$

Resultados similares a los obtenidos con la formula No.2

De los ejemplos anteriores se deducen algunas reglas importantes.

a.- La máxima capacidad de un banco de transformadores en paralelo se obtiene cuando todos los transformadores tienen la misma impedancia sobre la base de sus KVA de placa.

b.- En el caso de que las impedancias no sean iguales, es más conveniente que el transformador de menor capacidad tenga la impedancia más alta.

En el procedimiento anterior hay que hacer notar que las impedancias se tomaron como magnitudes escalares. Como sabemos, estas magnitudes son vectoriales en forma de números complejos. Sin embargo para resultados prácticos este grado de precisión no se requiere.

CONCLUSIONES

En conclusión se puede decir que el tema documento nos ayudó de gran manera conocer el tema de los transformadores trifásicos y por ende en el de máquinas eléctricas con mayor profundidad, sobre toda la parte del trabajo de campo, con estos conocimientos que son vanos si nos ponemos a tomar en cuenta la importancia de los transformadores en todas sus aplicaciones y sobre todo al conocer su construcción, conexiones, podemos conocer por se eligen de acuerdo al trabajo que van a realizar.

BIBLIOGRAFIA

Transformadores de Potencia, de Medida y de Protección. Enrique Ras.

<http://es.wikipedia.org/wiki/Transformador>

Stephen J. Chapman, Fundamentos de circuitos eléctricos. 4th_Edition

<http://www.nichese.com/trans-auto.html>

[http://www.asifunciona.com/tablas/transfor madores/simb_transf.htm](http://www.asifunciona.com/tablas/transfor%20madores/simb_transf.htm)

Maquinas Electricas I / Meliton Capcha Aira /Universidad Nacional de Ingenieria.

Maquinas Electrica I /Salvador/ Universidad Nacional de Ingenieria.

INSTITUTO TECNOLOGICO DE MASSACHUSETTS, "CIRCUITOS MAGNETICOS Y TRANSFORMADORES".

A. FITZGERALD – KINGSLEY – KUSKO, " TEORIA Y ANALISIS DE LAS MAQUINAS ELECTRICAS" , ED. HISPANO EUROPEA, 1984.

M.P. KOSTENKO – L.M. PIOTROVSKI, "MAQUINAS ELECTRICAS TOMOS I Y II, MIR 1975.

IVANOV – SMOLENSKY, "MAQUINAS ELECTRICAS TOMOS I, II Y III".