

CONEXIÓN DE TRANSFORMADORES TRIFÁSICOS EN PARALELO

Ing. Ramón Rivero de la Torre.
Instituto Tecnológico de Ciudad Madero

RESUMEN.

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. Defasamiento 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.

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

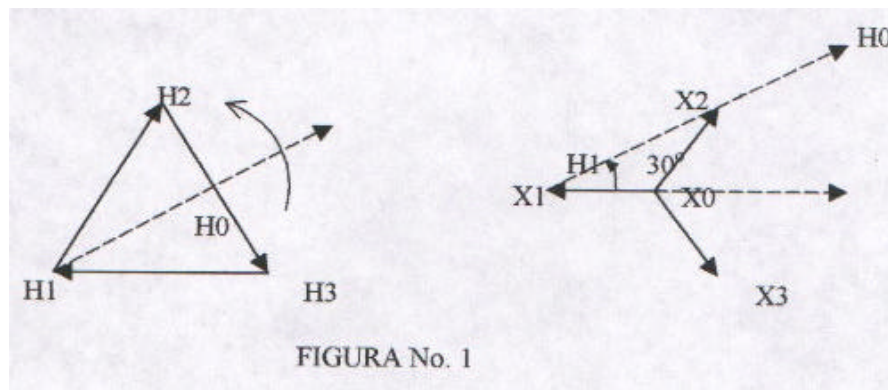
Dentro de estas últimas, se analizarán sólo tres, que algunas veces es necesario reconsiderar, principalmente cuando aparecen las inoportunas emergencias, que casi a todos se nos han presentado en nuestro trabajo.

DESPLAZAMIENTO ANGULAR

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

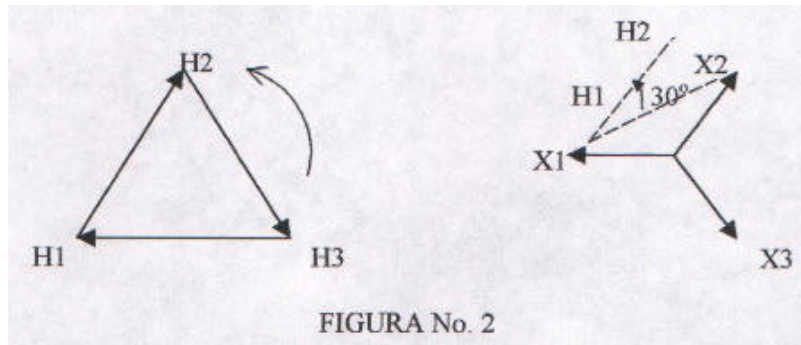
El ANSI establece que en un sistema delta-estrella (Alta y Baja Tensión) el sistema de alta tensión, está adelantado 30 grados con respecto al sistema de baja tensión. La medición de este ángulo, que es el desplazamiento angular, puede hacerse de dos maneras:

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 No. 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, A_1 , A_2 , A_3 pueden conectarse en paralelo; B_1 , B_2 , y B_3 también; C_1 , C_2 , y C_3 igualmente, y, por último D_1 , D_2 , y D_3 .

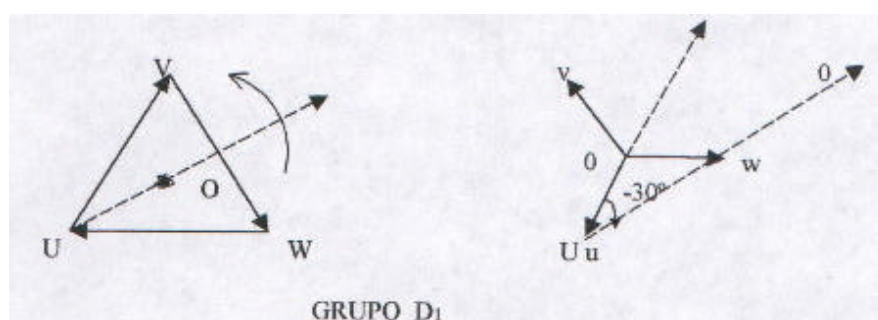
En cambio, las combinaciones pertenecientes a dos grupos distintos son incompatibles en principio: A_1 no puede acoplarse con D_1 o D_2 , o con C_1 o C_2 , etc., porque, existiendo coincidencia de fases primarias, no puede haberla entre las secundarias.

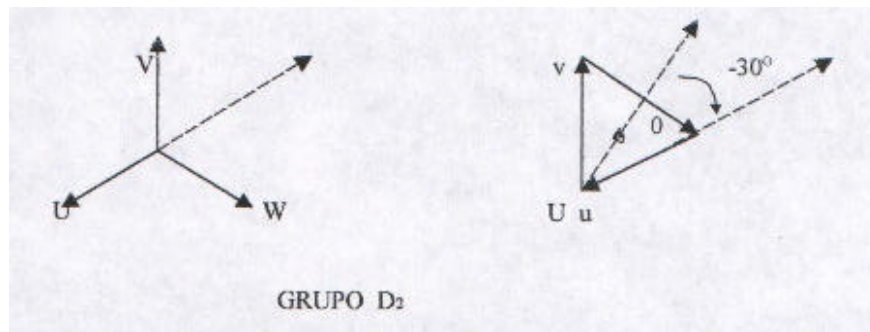
Como puede observarse sí se pueden paralelar los transformadores de un mismo grupo.

Podemos comprobar el paralelaje entre el transformador D_1 con el D_2 .

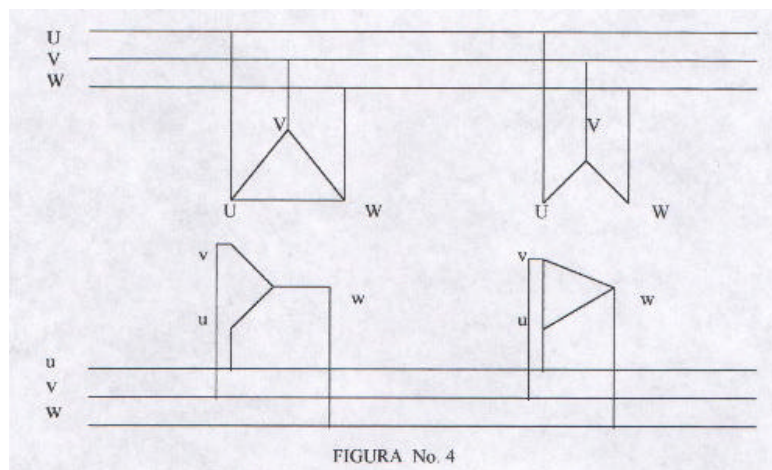
1	2	3	4	5	6	7	8
Identificación		Diagrama		Esquema		(*) Relación de tens. compuestas $\frac{U_{AT}}{U_{BT}}$	Antigua designa- ción V.D.E.
Desfase (Ang. de la BT en retraso)	Denomi- nación C. E. I.	AT	BT	AT	BT		
0°	Dd0					$\frac{N_A}{N_B}$	A1
	Yy0					$\frac{N_A}{N_B}$	A2
	Dz0					$\frac{2N_A}{3N_B}$	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
180°	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 No. 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)



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:

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

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

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:

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

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

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 55° de sobre
temperatura 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:

$$x + y = 1500 \text{ KVA.}$$

$$6y = 1500.$$

$$y = 250.$$

$$x = 1250.$$

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:

$$1.8 y = 1500 \text{ KVA.}$$

$$y = 833.33 \text{ KVA.}$$

$$x = 666.67 \text{ KVA.}$$

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

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

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

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?

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

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:

T1 = 100 KVA T2 = 1000 KVA

$Z_1 = 4.5 \%$ $Z_2 = 5.5 \%$

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

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

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:

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

$x = 100$ 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.

BIOGRAFÍA.

El Sr. Ing. Ramón Rivero de la Torre nació en Ciudad Madero, Tamps; estudió en el Instituto Tecnológico de Ciudad Madero, obteniendo el título de Ingeniero Electricista en 1960 como miembro de la primera Generación.

Laboró durante 30 años en la Comisión Federal de Electricidad, donde desarrolló trabajos en plantas termoeléctricas, hidroeléctricas y geotérmicas; en despacho de carga; y en construcción, operación y mantenimiento de subestaciones de potencia y distribución. También aplicó su ingeniería en áreas de áreas de distribución y medición, tanto a nivel zona, departamental y divisional. Lo anterior lo desarrolló en 10 estados de la República Mexicana.

Durante el ejercicio de su profesión, el Ing. Rivero de la Torre ha recibido diversos reconocimientos, dentro de los que destaca el reconocimiento a nivel nacional por su labor relevante en el ejercicio profesional, entregado por la Federación de Colegios de Ingenieros Mecánicos Electricistas de la República Mexicana, A.C.

Actualmente es Maestro de Ingeniería Eléctrica del I.T.C.M. Cuenta con 54 generaciones de egresados en su haber, y es gerente de la Cia. Ingeniería Eléctrica Rivero, S.A. de C.V. que presta servicios profesionales a la industria.

BIBLIOGRAFÍA

- 1.- Transformadores de Potencia, de Medida y de Protección.
Enrique Ras.
- 2.- Libro de Enciclopedia.
C.E.A.C.
- 3.- Libro de Técnico Electricista.
Juan Corrales Martín
- 4.- Localización de Fallas en Equipos Eléctricos.
Stafford.
- 5.- IEM de México.
Ing. Reinaldo Frese