

CAPITULO 3

TRANSFORMADORES TRIFASICOS Y BANCOS

3.1.- Introducción

La transformación de potencia trifásica, puede hacerse mediante transformadores trifásicos o bancos formados por tres unidades monofásicas. El transformador trifásico es menos costoso que un banco de igual potencia, porque sus devanados están colocados sobre un núcleo magnético común, lo que, como se demostrará luego, permite un considerable ahorro de material. Los transformadores trifásicos pueden ser de tipo acorazado y de tipo núcleo.

3.1.1.- Transformador trifásico tipo acorazado

Puede considerarse como tres transformadores monofásicos de tipo acorazado, colocados uno junto a otro, tal como se muestra en la Figura 3.1 a). La única diferencia entre esta disposición y la de la Figura 3.1 b), que corresponde a un transformador trifásico, es que las láminas del núcleo de este último están entrelazadas, es decir, las tres partes del núcleo no están separadas. Esto hace que los flujos en el núcleo, correspondientes a fases diferentes, se superpongan en las partes indicadas por D-E-F y G.

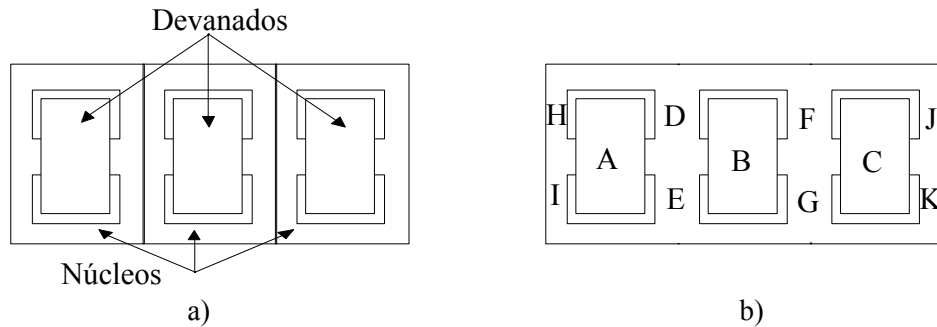


Figura 3.1.- Transformador de tipo acorazado: a) Tres transformadores monofásicos, b) La unidad trifásica correspondiente

Supongamos que el transformador funciona con tensiones inducidas sinusoidales equilibradas. En estas condiciones, los flujos en el núcleo deberán ser sinusoidales y estar equilibrados; por lo tanto pueden representarse por los vectores $\dot{\Phi}_A$, $\dot{\Phi}_B$ y $\dot{\Phi}_C$ de la Figura 3.2 a).

Los 3 devanados primarios pueden conectarse simétricamente en el circuito, de manera que los sentidos positivos de los flujos en el núcleo sean los mismos (Figura 3.2 b), o bien, pueden invertirse las conexiones de la fase central (Figura 3.2 c). En el primer caso:

$$\dot{\Phi}_D = \dot{\Phi}_E = \frac{1}{2}(\dot{\Phi}_A - \dot{\Phi}_B) = \frac{\sqrt{3}}{2} \Phi \quad (3.1)$$

donde $\Phi = |\dot{\Phi}_A| = |\dot{\Phi}_B| = |\dot{\Phi}_C|$. Lo mismo vale para Φ_F y Φ_G

En la Figura 3.2 c) en cambio:

$$\dot{\Phi}'_D = \dot{\Phi}'_E = \frac{1}{2}(\dot{\Phi}_A + \dot{\Phi}_B) = \frac{1}{2} \Phi \quad (3.2)$$

$$\text{Es decir:} \quad \frac{\Phi'_D}{\Phi_D} = \frac{1}{\sqrt{3}} = 0,577 \quad (3.3)$$

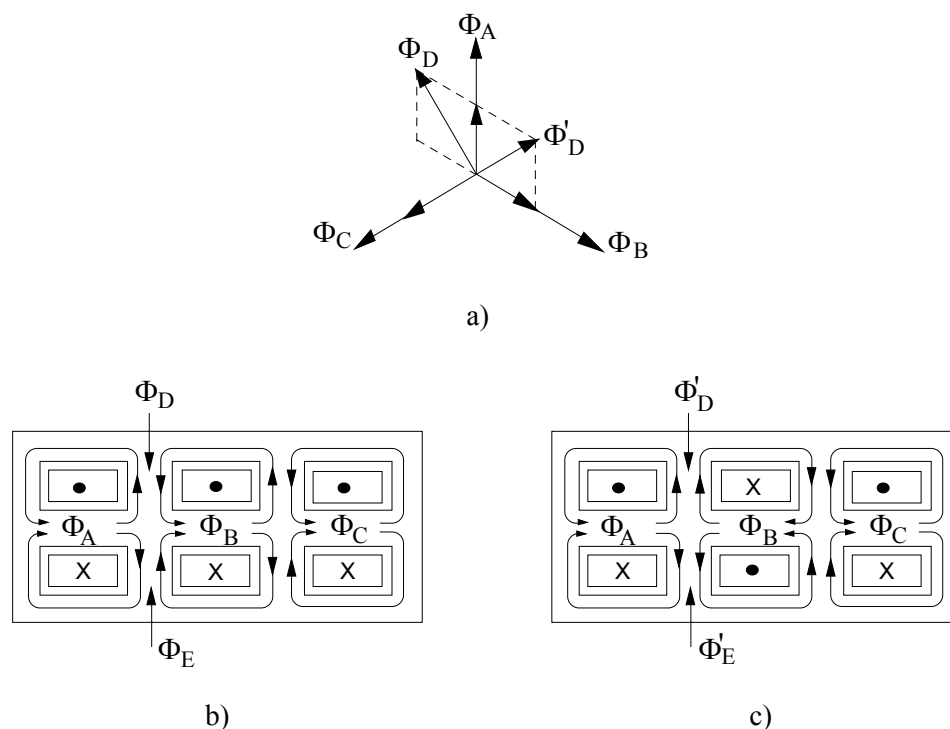


Fig. 3.2.- Relaciones de los flujos en un transformador trifásico de tipo acorazado; a) diagrama fasorial para tensiones de fase equilibrada, b) sentidos positivos de los flujos para devanados conectados simétricamente, c) sentidos positivos de los flujos cuando se invierten las conexiones de la fase central. El método normal de conexión es el indicado en c)

Por lo tanto, invirtiendo la conexión del enrollado central, el flujo en esta parte del núcleo es sólo del 57,7%, del que había con la conexión de la Figura 3.2.b). Se puede concluir entonces, que en estas condiciones, en las zonas D-E-F y G, el flujo es igual a la mitad del que existe en las zonas A-B y C e igual al flujo en las zonas H-I-J y K, lo que permite ahorrar una importante cantidad de material, tal como se indica en la Figura 3.3 (zona sombreada). En todas las partes del núcleo, excepto en las zonas D-E-F y G, los flujos son los mismos que existirían en los transformadores monofásicos. La superposición de los flujos no afecta de manera importante el funcionamiento del transformador trifásico de tipo acorazado, salvo en modificar la formas de onda y desequilibrar ligeramente las intensidades de las corrientes de excitación.

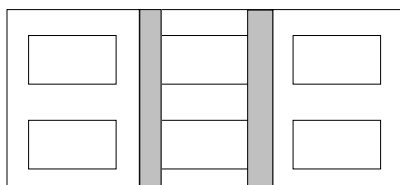


Figura 3.3.- Comparación de diseños con transformadores monofásicos y trifásicos del tipo acorazado

3.1.2.- Transformador trifásico tipo núcleo, con tres columnas

En la Figura 3.4, se muestra la formación de un transformador trifásico tipo núcleo a partir de tres unidades monofásicas. Si las tensiones aplicadas son sinusoidales, simétricas y equilibradas, los flujos de la Figura 3.4 a) cumplirán la relación:

$$\dot{\Phi}_A + \dot{\Phi}_B + \dot{\Phi}_C = 0 \quad (3.4)$$

Por lo tanto, se puede omitir la parte central del núcleo, tal como se muestra en la Figura 3.4 b). Sin embargo, por razones de construcción, se usa la disposición del núcleo mostrada en la Figura 3.4.c), lo que produce un ligero desequilibrio del circuito magnético para las tres fases, pero permite un importante ahorro de material del núcleo.

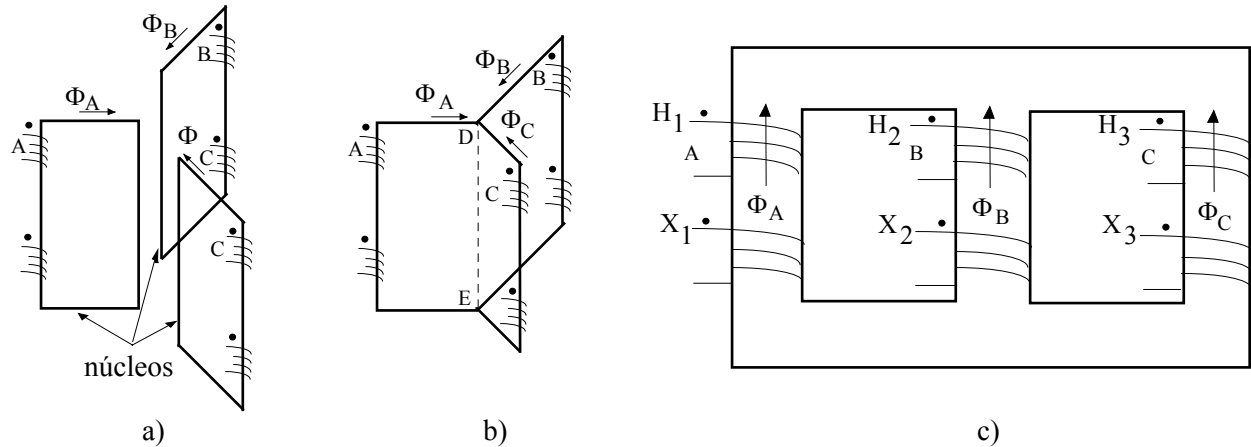


Figura 3.4.- Síntesis de un transformador trifásico de tres ramas, tipo de núcleo, a partir de tres unidades monofásicas

3.2.- Polaridad en transformadores trifásicos

En el caso de un banco trifásico formado por tres unidades monofásicas, se tiene para cada unidad, el concepto de polaridad explicado en 2.7. Lo mismo ocurre para cada fase de un transformador trifásico tipo acorazado.

En el transformador trifásico tipo núcleo, la situación es diferente. La polaridad se puede establecer sólo para los enrollados que están sobre una misma pierna o columna del núcleo. Junto al concepto de “marcas de polaridad”, se tiene el de “comienzos de enrollado” o “puntas de enrollado”, debido a la necesidad de que en todo instante se cumpla la relación (3.4). De esta forma, se puede considerar como “comienzos de enrollado” a los terminales tales que si por ellos entran corrientes, se establezcan flujos como los mostrados en la Figura 3.4 c). Para cada columna entonces; H_1 y X_1 (o H_2 y X_2 o H_3 y X_3) serán homólogos o no, dependiendo de si la polaridad es sustractiva o aditiva.

3.3.- Conexiones trifásicas de transformadores

Para efectos del análisis que se hará en este punto, se considerará como equivalentes a tres transformadores monofásicos, las tres columnas de un transformador trifásico tipo núcleo ó las tres fases de un transformador trifásico tipo acorazado.

3.3.1.- Consideraciones generales

Se utilizarán las siguientes convenciones:

- Los enrollados ubicados en una misma fase, se dibujan siempre paralelos y con las marcas de polaridad o de comienzo de enrollado en el mismo sentido.
- Los enrollados se dibujan ubicados formando ángulos entre si, iguales a la diferencia de fase entre las tensiones que existen en ellos y, por comodidad se representan por un trazo.

- Los transformadores se consideran ideales.
- Para todos los casos se considera secuencia positiva en los sistemas trifásicos de tensiones a ambos lados del transformador.
- Se considera positivo el ángulo en que las tensiones secundarias atrasan a las tensiones respectivas del primario.
- A cada tipo de conexión trifásica se le asigna un subíndice numérico (entre 0 y 12) que indica por que múltiplo de 30° , el fasor voltaje del lado secundario atrasa al fasor voltaje del primario. Esto se denomina desplazamiento angular de la conexión.
- Los bornes sacados al exterior, se designan con las letras H_1 , H_2 y H_3 , para el primario y X_1 , X_2 y X_3 para el secundario.

3.3.2.- Deducción de algunas conexiones

a) Conexión YY_0 o YY_{12} : Según lo indicado, significa que el primario y el secundario están en estrella y que el desfase entre ellos es de 0° (ó 360°)

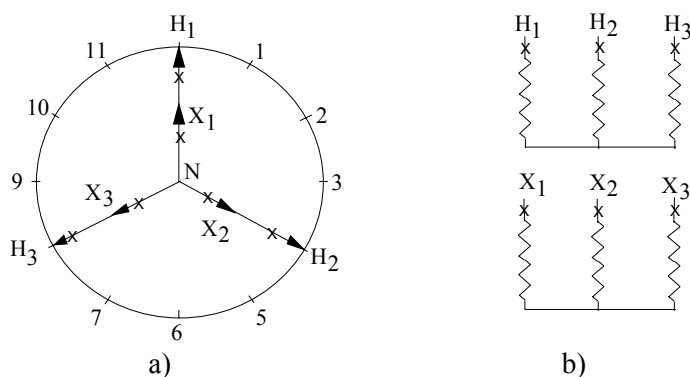


Figura 3.5.- Conexión YY_0 : a) Diagrama fasorial b) Conexión de los enrollados

b) Conexión ΔY_5 : Significa que el primario está conectado en delta o triángulo y el secundario en estrella y que el secundario atrasa al primario en 150° .

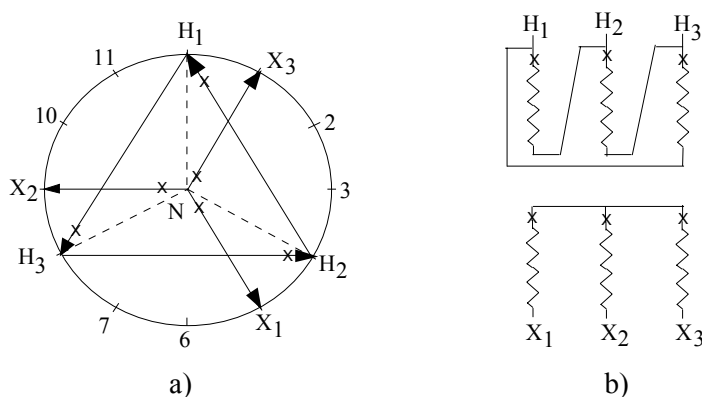


Figura 3.6.- Conexión ΔY_5 : a) Diagrama fasorial b) Conexión de los enrollados

c) **Conexión YZ_{11}** : La conexión Z, llamada Zig-Zag, requiere que cada fase tenga dos secundarios iguales, los que se interconectan por pares en serie, teniendo presente que la serie esté formada por enrollados de distinta fase. Uno de los objetivos de esta conexión, es que las corrientes de secuencia cero, que circulan por todas las fases con igual dirección y sentido, que producen fuerzas magnetomotrices (fmm) iguales y opuestas en cada fase, se compensen entre si.

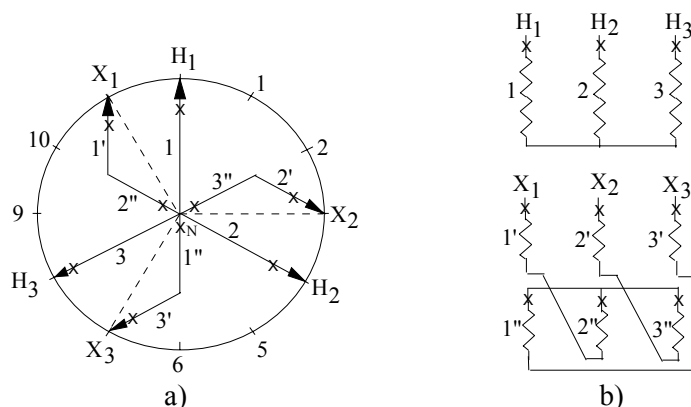


Figura 3.7.- Conexión YZ_{11} : a) Diagrama fasorial b) Conexión de los enrollados

3.3.3.- Determinación experimental del Desplazamiento angular de la conexión o del Diagrama fasorial

Se utiliza un método de corriente alterna, que permite determinar directamente el diagrama fasorial, efectuando una serie de medidas de voltaje en los bornes del transformador. Este consiste en lo siguiente:

Se conectan juntos un borne primario con uno secundario (H_1 y X_1 , por lo general) y se excita el transformador con un voltaje igual o inferior al nominal y de secuencia conocida, efectuándose medidas de tensión entre todos los otros terminales. Con los valores obtenidos se dibuja el diagrama fasorial a escala, lo que permite determinar el desplazamiento angular de la conexión. A manera de ejemplo, consideremos la Figura 3.8 siguiente, que muestra la conexión ΔY_5 ya vista.

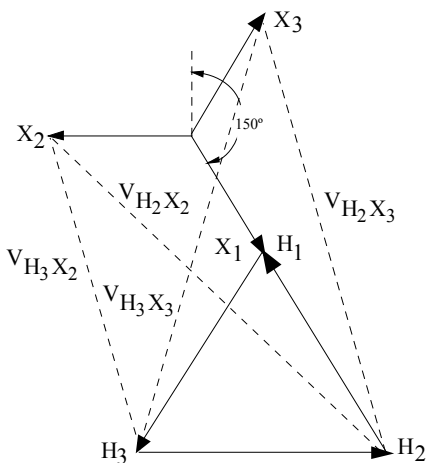


Figura 3.8.- Diagrama fasorial obtenido para la conexión ΔY_5

En la Figura 3.8 se aprecia que:

$$V_{H_2X_3} = V_{H_2X_2} = V_{H_3X_3} \neq V_{H_3X_2} \quad (3.5)$$

3.3.4.- Conclusiones

A modo de resumen podemos indicar lo siguiente:

- En los transformadores trifásicos no basta conocer la polaridad, ya que ella no indica de una manera completa las relaciones fasoriales.
- Debe usarse el concepto de desplazamiento angular, que indica el ángulo en que el fasor X_1-N atrasa al fasor H_1-N (o el fasor X_1-X_2 atrasa al H_1-H_2).
- La polaridad puede ser aditiva o sustractiva. Cuando es sustractiva, se obtienen desplazamientos angulares de 0° y $\pm 30^\circ$. Con polaridad aditiva, los desplazamientos angulares pueden ser de 180° y $180^\circ \pm 30^\circ$.
- Estos tipos de conexiones corresponden cuando se tiene secuencia positiva. Cuando la secuencia es negativa, se tiene lo siguiente: Aquellos grupos de conexiones de desplazamiento angular 0° ó 180° , no cambian. Los grupos de $0 \pm 30^\circ$ ó $180 \pm 30^\circ$, cambian a $0 \mp 30^\circ$ o $180 \mp 30^\circ$, respectivamente.

3.3.5.- Normas internacionales

a) Normas americanas: Designan los bornes como H_1 , H_2 y H_3 para el lado de alta tensión y x_1 , x_2 y x_3 para el lado de baja tensión. En cuanto al desplazamiento angular, aceptan sólo dos grupos de conexiones:

- **Grupo N° 1:** Con un desplazamiento angular de cero grados, obtenido con transformadores conectados en estrella-estrella ó delta-delta.
- **Grupo N° 2:** Con un desplazamiento angular de 30° , en que el lado de baja tensión atrasa 30° al lado de alta. Este se obtiene con conexiones estrella-delta ó delta-estrella.

Esta clasificación pone en evidencia el hecho de que sólo se acepta polaridad sustractiva.

b) Normas alemanas: Designan los bornes con las letras U, V y W para el lado de alta tensión y u, v y w para el de baja tensión. Admiten las conexiones tanto de polaridad aditiva como sustractiva.

3.4.- Circuito equivalente de un transformador trifásico

3.4.1.- Introducción

Cuando un transformador trifásico o un banco trifásico opera en condiciones balanceadas, puede analizarse considerando el circuito equivalente “por fase”. Este consiste en representar el transformador por una sola fase.

Con el objeto de mostrar más claramente la obtención del circuito equivalente, consideraremos un banco trifásico, formado por tres unidades monofásicas. El circuito equivalente de una de las unidades monofásicas se muestra en la Figura 3.9, donde se ha incluido un transformador ideal de razón $a:1$, con el fin de realizar las conexiones delta ó estrella de primario y del secundario del transformador trifásico ó del banco trifásico.

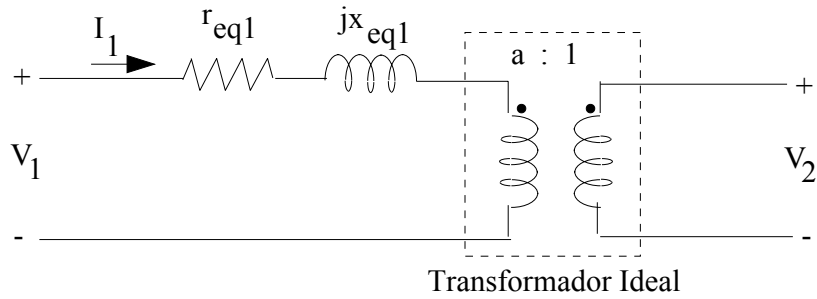


Figura 3.9.- Circuito equivalente aproximado de un transformador monofásico

3.4.2.- Conexión estrella-estrella (YY)

En la Figura 3.10 se muestra la conexión de un transformador trifásico ó de tres transformadores monofásicos formando un banco trifásico en conexión estrella tanto para el primario como para el secundario.

Se puede apreciar que para obtener el circuito equivalente “por fase”, basta con considerar una de las tres fases, ya que existe un punto común (neutro).

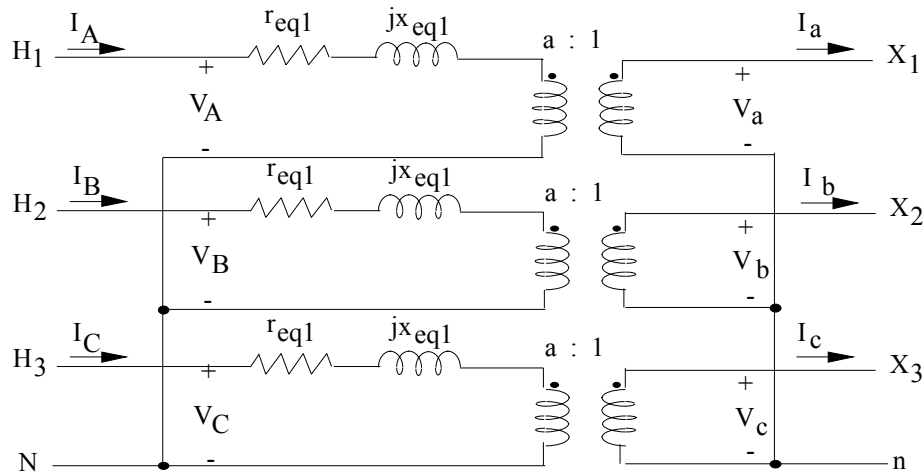


Figura 3.10.- Transformador trifásico en conexión estrella-estrella

La Figura 3.11, muestra el circuito equivalente por fase correspondiente, donde:

$$\begin{aligned} R_{eq1} &= r_{eq1} \\ X_{eq1} &= x_{eq1} \\ a_T &= a \end{aligned} \tag{3.6}$$

En la ecuación (3.6), a_T es la razón de transformación trifásica, es decir, la razón entre las tensiones de línea del primario y secundario. En este caso se tiene:

$$a_T = \frac{V_{H1H2}}{V_{X1X2}} = \frac{\sqrt{3}V_A}{\sqrt{3}V_a} = a \tag{3.7}$$

Es decir, las razones de transformación trifásica y monofásica son iguales.

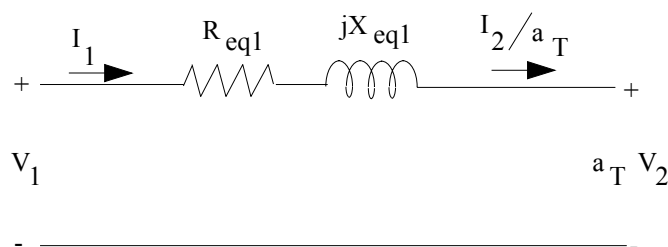


Figura 3.11.- Circuito equivalente por fase referido al primario de un transformador en conexión YY

3.4.3.- Conexión Delta-Delta ($\Delta\Delta$)

La Figura 3.12 muestra un transformador ó banco trifásico en conexión delta-delta. Como se observa, no es posible considerar una sola fase ya que no existe un punto común.

Si se cortocircuita el secundario; desde el primario se ve el circuito de la Figura 3.13 a), el que puede transformarse en una estrella equivalente, tal como el de la Figura 3.13 b), donde se puede obtener un “punto común” o “punto neutro”. Este punto no es real; sin embargo, permite considerar una sola fase del transformador trifásico.

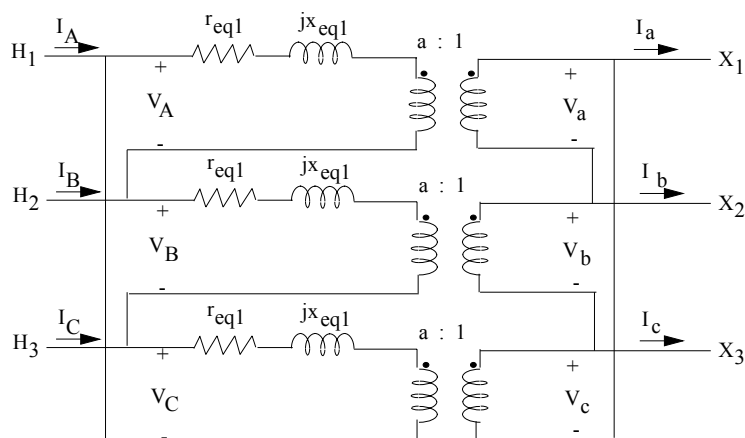


Figura 3.12.- Transformador trifásico en conexión delta-delta

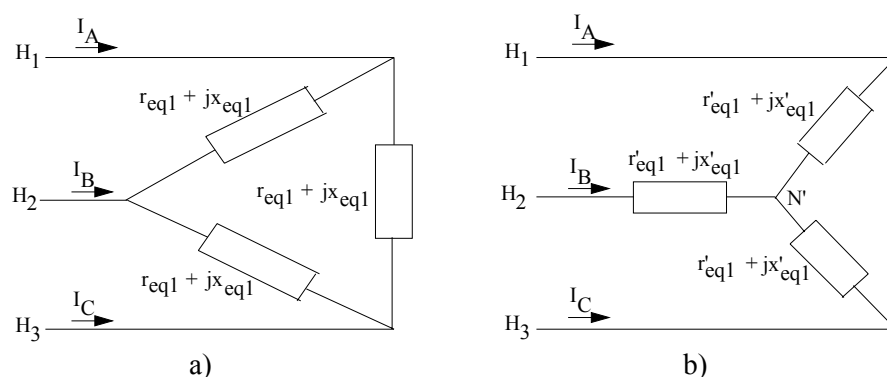


Figura 3.13.- Transformador trifásico en conexión $\Delta\Delta$ visto desde el primario al cortocircuitar el secundario:
a) Delta; b) Estrella equivalente

Para la Figura 3.13 b) se tiene:

$$z'_{eq1} = r'_{eq1} + jx'_{eq1} = \frac{Z_{eq}}{3} = \frac{r_{eq1} + jx_{eq1}}{3} \quad (3.8)$$

De acuerdo con esto, el circuito equivalente “por fase” del transformador trifásico en conexión $\Delta\Delta$ será el de la Figura 3.11, donde:

$$\begin{aligned} R_{eq1} &= r'_{eq1} = \frac{r_{eq1}}{3} \\ X_{eq1} &= x'_{eq1} = \frac{x_{eq1}}{3} \\ a_T &= \frac{V_{H1}H2}{V_{X1}X2} = \frac{V_A}{V_a} = a \end{aligned} \quad (3.9)$$

3.4.4.- Conexión delta-estrella

Bajo las mismas consideraciones anteriores, el circuito equivalente por fase, es el de la Figura 3.11, donde R_{eq1} y X_{eq1} corresponde a los dados en la expresión (3.9) y a_T es de la forma:

$$a_T = \frac{V_{H1}H2}{V_{X1}X2} = \frac{V_A}{\sqrt{3}V_a} = \frac{a}{\sqrt{3}} \quad (3.10)$$

3.4.5.- Conexión estrella-delta

En las condiciones planteadas, el circuito equivalente es el de la Figura 3.11, donde R_{eq1} y X_{eq1} están dados por la expresión (3.6) y a_T está dado por la expresión (3.11):

$$a_T = \frac{V_{H1}H2}{V_{X1}X2} = \frac{\sqrt{3}V_A}{V_a} = \sqrt{3} a \quad (3.11)$$

3.4.6.- Característica de excitación

Cuando se requiere, la característica de excitación se pueden representar por medio de una conductancia g_c y una susceptancia b_m conectadas en paralelo, a la entrada del circuito equivalente ya visto. En este caso, es posible demostrar, que si los parámetros están referidos a un lado del transformador trifásico que esté conectado en triángulo, su valor por fase es:

$$Y_0 = g_c - jb_m = 3 Y'_0 = 3 (g'_c - jb'_m) \quad (3.12)$$

donde Y'_0 corresponde al valor de la admitancia de excitación en cada lado del triángulo.

3.4.7.- Valor de los parámetros en por unidad

Cuando los parámetros del circuito equivalente por fase se expresan en por unidad, sus valores son independientes de la conexión, es decir:

$$Z_Y (\text{pu}) = Z_{\Delta} (\text{pu})$$

$$Y_Y (\text{pu}) = Y_{\Delta} (\text{pu})$$
(3.13)

donde el subíndice Δ indica que el enrollado está en triángulo y el subíndice Y, la estrella equivalente.

Por otra parte, al igual que en el transformador monofásico, al expresar los parámetros en (pu) en la base propia y considerando que la prueba de cortocircuito se ha hecho a corriente nominal y que la de vacío se hizo a voltaje nominal, se tiene:

$$Z_{eq} (\text{pu}) = \frac{V_{CC}}{V_N}$$

$$R_{eq} (\text{pu}) = \frac{P_{CC}}{S_N}$$

$$g_C (\text{pu}) = \frac{P_0}{S_N}$$

$$b_m (\text{pu}) = \frac{Q_0}{S_N}$$
(3.14)

en que todas las tensiones y potencias deben ser trifásicas (o todas por fase).

3.4.8.- Determinación experimental de los parámetros del circuito equivalente “por fase”

El procedimiento es similar al empleado en el transformador monofásico, excepto que todas las conexiones y mediciones son trifásicas; es decir, las tensiones se miden entre líneas (V_{CC} , V_0), las corrientes son las de línea (I_{CC} , I_0) y la potencia es la total (P_{CC} y P_0).

Los valores de los parámetros del circuito equivalente “por fase” se calculan con la tensión “por fase” ($V_{CC}/\sqrt{3}$, $V_0/\sqrt{3}$), corrientes de línea (I_{CC} , I_0) y potencia por fase ($P_{CC}/3$; $P_0/3$). Para cualquier tipo de conexión de los enrollados del transformador trifásico se tiene entonces:

$$Z_{eq} = \frac{V_{CC}}{\sqrt{3} I_{CC}} \quad R_{eq} = \frac{P_{CC}}{3 I_{CC}^2}$$

$$g_c = \frac{P_0}{V_0^2} \quad b_m = \frac{Q_0}{V_0^2} = \frac{\sqrt{(\sqrt{3} V_0 I_0)^2 - P_0^2}}{V_0^2}$$
(3.15)

3.4.9.- Razón de transformación del transformador trifásico (a_T)

Es conveniente hacer notar que debido a que en general, las tensiones primaria y secundaria de un transformador trifásico presentan desfases que dependen del tipo de conexión; la razón de transformación es un número complejo.

En la práctica; sin embargo, es usual considerarla como un número real positivo (módulo de $\hat{a}_T$) y tomar en cuenta el desfase por inspección, de acuerdo a la conexión particular. Por ejemplo, para la conexión ΔY_5 se puede demostrar que $\hat{a}_T = |\hat{a}_T| \angle 150^\circ$.

3.5.- Pérdidas dispersas

De la misma forma que en el transformador monofásico, las pérdidas dispersas se calculan restando las pérdidas RI^2 en corriente continua a las medidas en la prueba de cortocircuito. De esta forma, si R_1 y R_2 son las resistencias medidas con corriente continua, entre dos terminales del lado primario y dos del secundario respectivamente, siendo I_1 e I_2 las respectivas corrientes de línea; las pérdidas totales RI^2 , independiente del tipo de conexión de los enrollados, serán:

$$RI_{\text{total}}^2 = 1,5 (R_1 I_1^2 + R_2 I_2^2) \quad (3.16)$$

Por lo que las pérdidas dispersas se determinan como:

$$P_{\text{SL}} = P_{\text{CC}} - 1,5 (R_1 I_1^2 + R_2 I_2^2) \quad (3.17)$$

Donde P_{CC} corresponde a las pérdidas medidas en la prueba de cortocircuito, para las mismas corrientes.

3.6.- Armónicos en transformadores trifásicos y bancos

3.6.1.- Introducción

En los transformadores monofásicos, suele despreciarse los armónicos de la corriente de excitación, debido a su pequeño valor. Sin embargo, los fenómenos de armónicos en sistemas trifásicos pueden, en algunos casos, ejercer efectos importantes en las características del sistema, particularmente, en el comportamiento de los bancos trifásicos estrella-estrella.

Por otra parte, a pesar de su tamaño relativamente pequeño, los armónicos de la corriente de excitación de un banco trifásico pueden, en ciertas ocasiones, inducir en los circuitos de comunicaciones cercanos, tensiones que interfieran seriamente con el funcionamiento adecuado de dichos circuitos.

Según lo estudiado en el Capítulo 1, la corriente de excitación de un reactor con núcleo saturable (equivalente al comportamiento de un transformador en vacío), no es sinusoidal y se puede representar aproximadamente por:

$$i_0(t) = I_{01} \cos(\omega t - \varphi_1) + I_{03} \cos(3\omega t - \varphi_3) + I_{05} \cos(5\omega t - \varphi_5) \quad (3.18)$$

donde se han despreciado los armónicos de orden superior a cinco.

En la realidad, el tercer armónico es el más importante debido a que en muchos casos su valor eficaz es comparativamente grande frente al valor de la fundamental y adicionalmente, como su período es un tercio del de ésta, las componentes de las tres fases quedan en fase, tal como se muestra en la Figura 3.14. Según esto, presentan características de componentes de secuencia cero.

En cuanto a los quintos armónicos y, de acuerdo con lo que se muestra en la Figura 3.15, presentan características de componentes de secuencia negativa; es decir, tienen invertido el orden de las corrientes de las fases, según se puede verificar en la misma Figura.

Se analizará a continuación, el comportamiento de los transformadores trifásicos y bancos, de acuerdo a la conexión de sus enrollados y al tipo de núcleo que tengan, considerando solamente los terceros armónicos, en consideración a lo ya indicado.

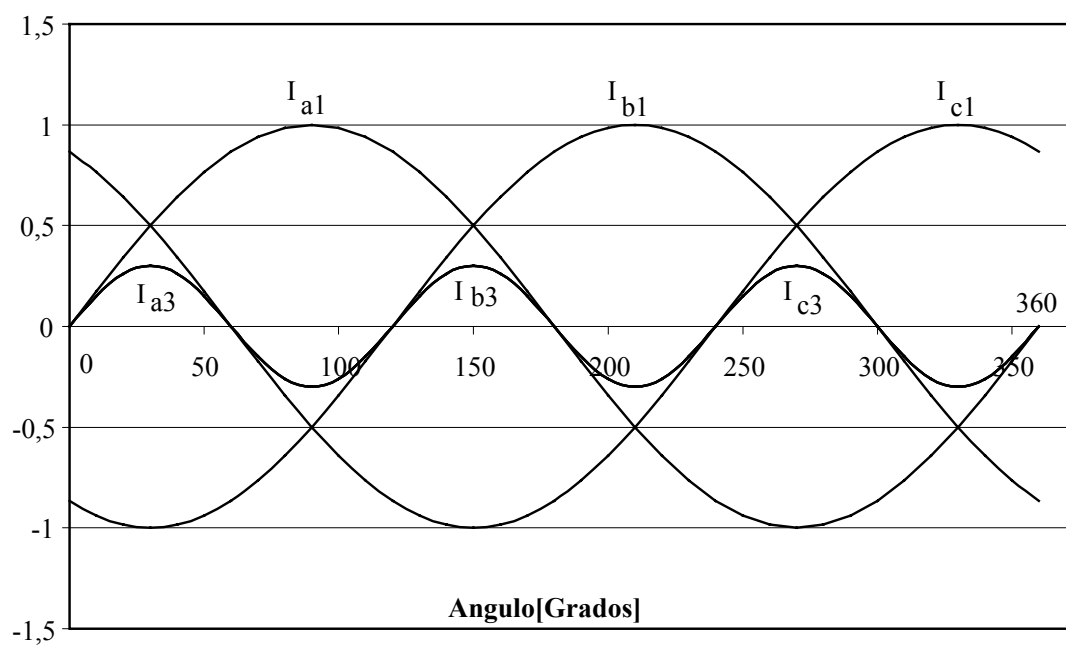


Figura 3.14.- Corriente de excitación de primer y tercer armónico en un transformador trifásico

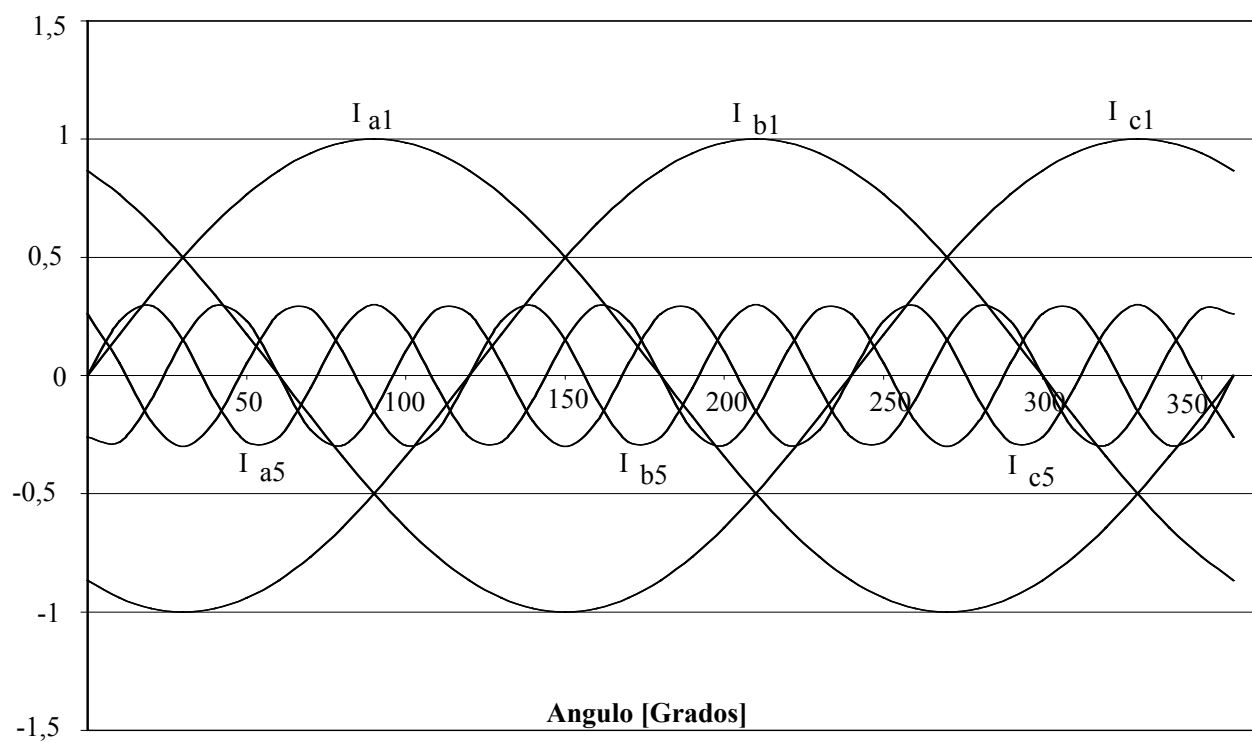


Figura 3.15.- Corriente de excitación de primer y quinto armónico en un transformador trifásico

3.6.2.- Transformador estrella-estrella sin neutro

a) **Tipo acorazado ó banco:** Consideremos la Figura 3.16 que esquematiza esta situación.

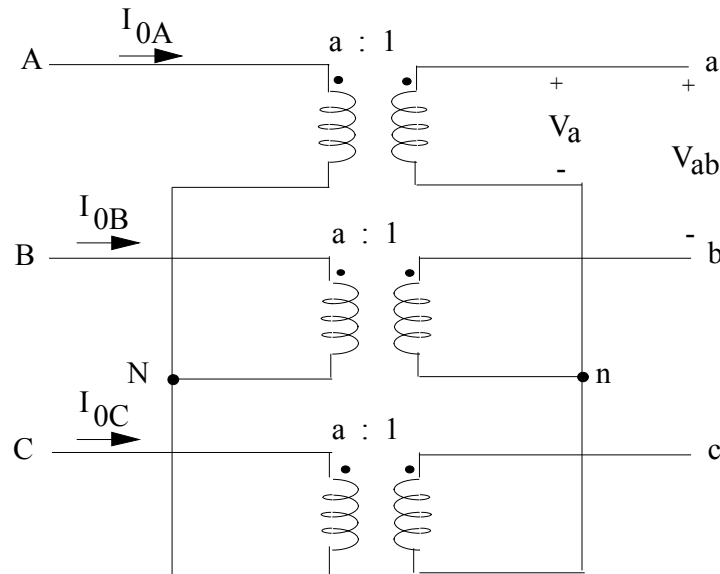


Figura 3.16.- Transformador trifásico en conexión estrella-estrella sin neutro (con neutro flotante)

Considerando los sentidos de las corrientes y al hecho de que no existe conductor entre el neutro del primario del transformador y el neutro de la fuente de alimentación (que no se muestra), la suma (fasorial) de las corrientes de excitación de las tres fases debe ser cero; es decir, para los terceros armónicos se debe cumplir:

$$\dot{I}_{0A3} + \dot{I}_{0B3} + \dot{I}_{0C3} = 0 \quad (3.19)$$

La única forma para que (3.19) se cumpla es que $\dot{I}_{0A3} = \dot{I}_{0B3} = \dot{I}_{0C3} = 0$, es decir, si se desprecia los armónicos superiores al tercero, la corriente de excitación sería sinusoidal, (ya que los terceros armónicos están obligados a ser cero debido a la conexión), pero entonces, dadas las características no lineales del núcleo, el flujo deja de ser sinusoidal. Esto significa, que aparecen terceros armónicos en la onda del flujo establecido en el núcleo y en las tensiones inducidas en los enrollados. Sin embargo, por el hecho de que los terceros armónicos están todos en fase, las tensiones entre líneas no presentan terceros armónicos (recuérdese que $\dot{V}_{ab} = \dot{V}_a - \dot{V}_b$)

La tensión eficaz por fase (conteniendo terceros armónicos) es:

$$V_a = \sqrt{V_{a1}^2 + V_{a3}^2} \quad (3.20)$$

Donde V_{a1} y V_{a3} son los valores efectivos de la fundamental y del tercer armónico respectivamente. V_{a3} suele variar entre un 30 y un 70% de V_{a1} . Si como valor representativo consideramos que V_{a3} es un 50% de V_{a1} , se tiene que $V_{ab} = 1,12 \sqrt{3} V_{a1}$.

b) Tipo núcleo: Debido a la configuración del núcleo y a los sentidos de arrollamiento y corriente en ellos, los flujos de tercer armónico, que en las tres columnas tienen en todo instante la misma magnitud y sentido (Figura 3.4.c) están obligados a cerrar su circuito magnético a través del aire. Como la reluctancia del aire es más elevada que la del material magnético, se tiene que la magnitud de estos flujos es pequeña. Por ello, en el

transformador trifásico tipo núcleo, aún cuando no pudieran circular corrientes de tercer armónico en las líneas, las tensiones por enrollado se deforman muy poco.

3.6.3.- Transformador estrella-estrella con neutro encadenado

Las corrientes de tercer armónico pueden circular por las líneas si se conectan los neutros del primario del transformador y del generador (fuente). Esto permite eliminar los terceros armónicos de las tensiones fase neutro, pero se puede producir interferencia inductiva en circuitos cercanos, sobre todo en el caso en que la conexión entre los neutros se realiza a través del suelo. Para verificar esto, consideremos la Figura 3.17 donde se muestra una línea de potencia trifásica A-B-C y una línea telefónica a-b descubierta. Para mayor sencillez supondremos que ambos circuitos están en un mismo plano y que en el instante considerado los sentidos de las corrientes son los indicados.

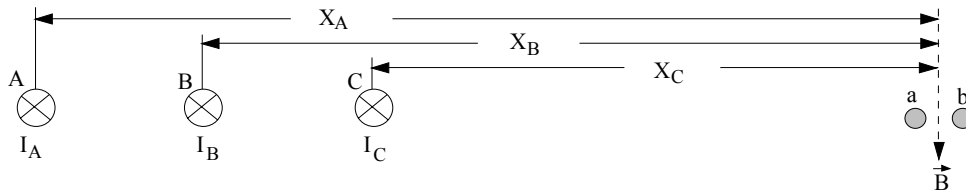


Figura 3.17.- Líneas de potencia A-B-C y telefónica a-b, paralelas

Aplicando la Ley Circuital de Ampere se tiene:

$$\vec{B} = \frac{\mu_0}{2\pi} \left(\frac{\vec{I}_A}{X_A} + \frac{\vec{I}_B}{X_B} + \frac{\vec{I}_C}{X_C} \right) \quad (3.21)$$

En que $\vec{B}$, es la inducción magnética total sobre el circuito telefónico. Si se supone que la separación entre conductores de potencia es bastante menor que las distancias al circuito de comunicación, se tiene, en forma aproximada que $X_A = X_B = X_C = X$ y por lo tanto:

$$\vec{B} = \frac{\mu_0}{2\pi X} (\vec{I}_A + \vec{I}_B + \vec{I}_C) \quad (3.22)$$

Si las corrientes de línea están equilibradas, las corrientes sinusoidales desfasadas 120° (tales como los armónicos fundamentales, quintos, séptimos, etc.) dan una suma nula en todo instante y si, según lo indicado, las distancias de las tres fases al circuito de comunicación es prácticamente la misma, la inducción magnética $\vec{B}$ resultante creada por estos armónicos es aproximadamente cero. No obstante, si la línea de potencia suministra la corriente de excitación a un transformador o banco estrella-estrella con neutro encadenado, las corrientes de las líneas contienen terceros armónicos.

Para mayor sencillez, supongamos que la conexión de los neutros se hace a través del suelo y que el efecto inductivo del tercer armónico de la corriente de tierra es despreciable debido a la altura a la que los circuitos se encuentra sobre el suelo. Los terceros armónicos de las tres corrientes de línea están en fase en las tres fases y por lo tanto, los valores instantáneos de las inducciones magnéticas debidos a ellos se suman directamente, produciendo un efecto inductivo importante. Por otra parte, la frecuencia es el triple de la fundamental, por lo que la tensión inducida es de esta frecuencia y su valor es tres veces mayor que la tensión de frecuencia fundamental que induciría un flujo fundamental igual. Recordemos para justificar lo anterior, que:

$$E_{ind} = 4,44 f N A B_{m\acute{a}x} \quad (3.23)$$

3.6.4.- Transformador estrella-triángulo

Consideremos el banco estrella-triángulo de la Figura 3.18. En el lado primario, el banco se comporta de la misma forma que el banco estrella-estrella visto en 3.6.3. Es decir, las tensiones primarias varían sinusoidalmente; cada transformador monofásico ó cada fase recibe su corriente de excitación y los terceros armónicos de la corriente de excitación circulan por el conductor neutro.

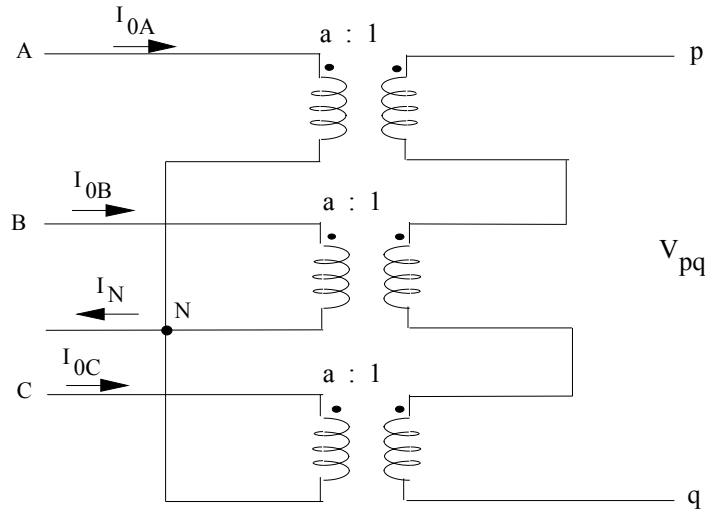


Figura 3.18 .- Transformador estrella-delta abierta

Los terceros armónicos, de las corrientes de excitación crean pequeñas caídas de tensión en las impedancias de fuga de los transformadores y por lo tanto, las fuerzas electromotrices inducidas por el flujo mutuo contienen terceros armónicos débiles que aparecen como componentes pequeños de las tensiones de los secundarios. Como estas componentes (de tercer armónico) están en fase en los tres transformadores, la tensión en el vértice del triángulo secundario (bornes pq) contiene un tercer armónico V_{pq} , cuyo valor es el triple del de cada transformador monofásico o de cada fase.

Aún cuando esta tensión suele ser pequeña comparada con las tensiones secundarias, si se unen los bornes pq, es capaz de crear una corriente de tercer armónico que circula por el Delta del secundario. La acción combinada de las corrientes de excitación de tercer armónico que circulan por el primario y secundario, crea las fuerzas magnetomotrices de esta frecuencia, necesarias para permitir variaciones prácticamente sinusoidales del flujo, como ocurre en forma mejor aún, en la conexión delta-delta. Por ello, al cerrar el delta del secundario, se reducen los terceros armónicos de las corrientes de excitación del primario.

Si al cerrar la delta del secundario, se desconecta el neutro, la corriente de excitación del primario no contiene terceros armónicos. El triángulo cerrado del secundario proporciona un camino para los terceros armónicos de las corrientes. Como para crear esta corriente se requiere una fuerza electromotriz de dicha frecuencia, el flujo mutuo se ajusta por sí mismo para contener el tercer armónico necesario para generarla. Por lo tanto, el flujo mutuo induce un tercer armónico de la tensión respecto al neutro en el primario, pero por lo general, éste es de valor muy pequeño y la onda de tensión primaria respecto al neutro es prácticamente sinusoidal.

Para las conexiones delta-estrella y delta-delta ocurre algo similar, por lo que podemos consignar a manera de conclusión, lo siguiente:

Los componentes de tercer armónico de la corriente de excitación necesarios para una variación sinusoidal del flujo, circulan por los devanados conectados en delta, de un banco triángulo-triángulo; triángulo-estrella ó estrella-triángulo, pero (para transformadores exactamente iguales) no están presentes en

las líneas trifásicas conectadas a los transformadores, cuando se aíslan los neutros de los devanados conectados en estrella, de los otros sistemas de neutros.

Debido a la ausencia de terceros armónicos en las corrientes de línea que alimentan enrollados conectados en triángulo, los valores eficaces de las corrientes de línea y de enrollados en vacío, no quedan relacionados por $\sqrt{3}$.

Sean I_{01} , I_{03} , los valores eficaces del primer y tercer armónico respectivamente en los 3 transformadores conectados en delta e $I_{0\Delta}$, el valor eficaz de la corriente de excitación de cada uno de ellos. Entonces se puede escribir:

$$I_{0\Delta} = \sqrt{I_{01}^2 + I_{03}^2} \quad (3.24)$$

La corriente de la línea en vacío I_L es: $I_{0L} = \sqrt{3} I_{01}$ y por lo tanto:

$$I_{0L} = \sqrt{3} \sqrt{I_{0\Delta}^2 - I_{03}^2} \quad (3.25)$$

Si por ejemplo I_{03} es el 40% de $I_{0\Delta}$, entonces :

$$I_{0L} = 0,92 \sqrt{3} I_{0\Delta} \quad (3.26)$$

3.6.5.- Transformadores estrella-zig zag

Si el neutro de la estrella está aislado, no hay terceros armónicos en la corriente de excitación. Esto significa que el flujo mutuo debe contener terceros armónicos al igual que las tensiones secundarias inducidas. Sin embargo, como a cada fase del secundario le corresponden dos enrollados en oposición, los terceros armónicos de la tensión se anulan, por lo que no existen terceros armónicos en las tensiones de fase y de línea, en el secundario. Esta es una de las propiedades de la conexión zig-zag.