

# Fenómenos de armónicos en los circuitos trifásicos

En los transformadores monofásicos suelen despreciarse los armónicos de la corriente de excitación a causa de su pequeñez. En muchos problemas en los que intervienen bancos trifásicos de transformadores pueden, también, despreciarse como se hizo en el capítulo XXI, donde las corrientes de excitación se representan por ondas sinusoidales. Sin embargo, las peculiaridades de los fenómenos de armónicos en sistemas trifásicos pueden, en algunas ocasiones, ejercer efectos importantes sobre las características del sistema, particularmente en el comportamiento de los bancos estrella-estrella de transformadores monofásicos. Además, a pesar de su tamaño relativamente pequeño, los armónicos de la corriente de excitación en un banco trifásico de transformadores pueden, en ciertas condiciones, inducir en los circuitos de comunicaciones próximas tensiones que interfieran seriamente con el funcionamiento adecuado de dichos circuitos. Los técnicos encargados de sistemas de potencia y de circuitos de comunicaciones deberán estar preparados para impedir situaciones de ese tipo. A continuación se estudiarán estos fenómenos de armónicos.

## 1. PRIMARIOS CONECTADOS EN TRIÁNGULO

De momento, consideremos tres transformadores con sus primarios conectados en triángulo, estando sus secundarios en circuito abierto y no conectados entre sí.

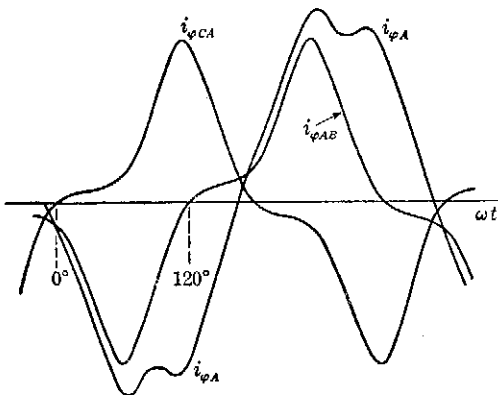


FIG. 1. Formas de onda de las corrientes de excitación en dos fases del triángulo y en una de las líneas que alimenta un grupo de primarios conectados en triángulo

Si los transformadores son exactamente iguales y están equilibradas las tensiones de la línea, las formas de onda de las corrientes de excitación de los transformadores son iguales, pero están defasadas en  $120^\circ$ . Si las tensiones de línea varían sinusoidalmente, las formas de onda de las corrientes de excitación tienen la forma general indicada en la figura 9 del capítulo VI. Así pues, las formas de onda de las corrientes de excitación  $i_{\phi CA}$  e  $i_{\phi AB}$  en dos de los transformadores son de la forma indicada en la figura 1 por las ondas picudas.

La corriente de excitación suministrada por la línea A es:

$$i_{\phi A} = i_{\phi AB} - i_{\phi CA} \quad (1)$$

y está representada por la onda con doble cresta. Obsérvese que la forma de onda de las corrientes de excitación en las líneas es muy diferente de la forma de onda de las corrientes de excitación en los transformadores conectados en triángulo.

En las dos próximas secciones de este apartado se estudian las dos razones de esta diferencia.

1a. *Terceros armónicos.* Consideremos en primer lugar los terceros armónicos de las corrientes en el triángulo. En la figura 2a pueden verse tres corrientes  $i_{CA}$ ,  $i_{AB}$ ,  $i_{BC}$ , que tienen formas de onda exactamente iguales y defasadas en un tercio de período, o sea  $120^\circ$ . Estas corrientes contienen terceros armónicos que dan lugar

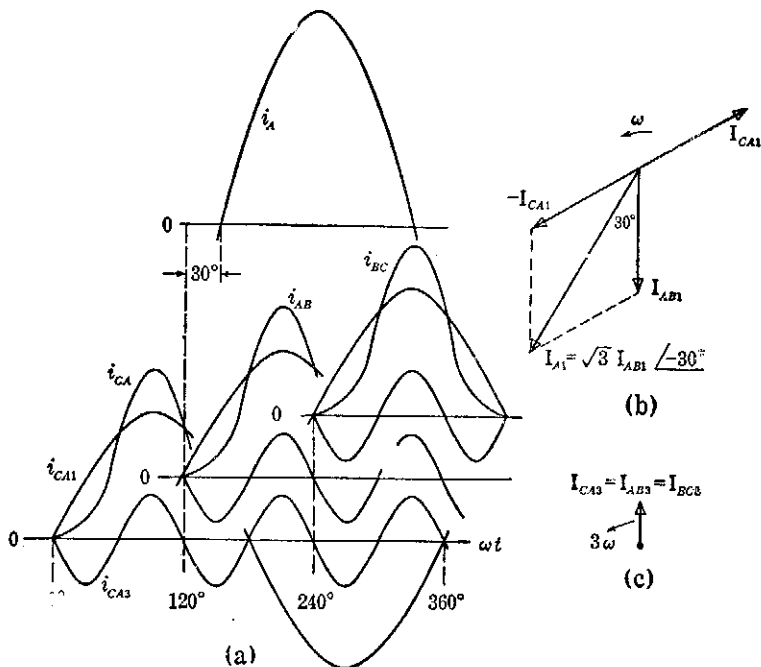


FIG. 2. Corrientes del triángulo equilibradas y sus terceros armónicos; a) formas de onda b) diagrama vectorial de los armónicos fundamentales y c) diagrama vectorial de los terceros armónicos

a una forma de onda picuda, análoga a la de las corrientes de excitación. Como  $i_{AB}$  está retrasada respecto a  $i_{CA}$  en un tercio de período, el tercer armónico de  $i_{AB}$  está retrasado respecto al tercer armónico de  $i_{CA}$  en tres tercios de período, o sea un período completo del tercer armónico, según se ve en la figura 2a. Los terceros armónicos de las corrientes se hallan, pues, en concordancia de fase\*, según puede verse también en el diagrama vectorial de la figura 2c. Si  $i_{AB}$  e  $i_{CA}$  son las corrientes que circulan por las fases  $AB$  y  $CA$  del triángulo, la corriente  $i_A$  en la línea es su diferencia, según indica la ecuación (1). La diferencia entre las componentes fundamentales está representada vectorialmente en la figura 2b. En cambio, la diferencia entre los terceros armónicos instantáneamente iguales es cero.

\* En la terminología de las componentes simétricas se llama a los terceros armónicos componentes de secuencia cero. En el apartado 4 del capítulo XXIV se realiza un breve estudio de las aplicaciones de la teoría de las componentes simétricas a los transformadores.

► Por tanto, cuando los transformadores son iguales y las tensiones están equilibradas, no podrán circular por las líneas terceros armónicos de las corrientes. ◀

No obstante, si las tensiones de línea varían sinusoidalmente, las corrientes de excitación de los transformadores conectados en triángulo deberán tener terceros armónicos a causa de la no linealidad de las características magnéticas de los núcleos\*. Estos terceros armónicos, por ser iguales en cada instante y de igual sentido a lo largo del triángulo, no hacen más que circular por los primarios del triángulo, pero no aparecen en las líneas. Con el mismo razonamiento puede demostrarse que todos los armónicos de orden múltiplo del tercero —sexto, noveno, etc.— se comportan en los circuitos trifásicos de igual forma que el tercero. Por ejemplo, el defasaje entre los armónicos novenos es de nueve tercios, o sea tres períodos enteros, por lo que dichos armónicos novenos se hallan en concordancia de fase y se comportan como los terceros armónicos.

► Así pues, cuando el circuito está perfectamente equilibrado, por un triángulo podrán circular los armónicos tercero, sexto, noveno, etc. de las corrientes, sin que circulen por las líneas que alimentan al triángulo. ◀

Aun cuando tres transformadores de igual diseño pueden tener características casi iguales, es imposible alcanzar una identidad exacta en los materiales y conjuntos, y en consecuencia, por las líneas podrán circular corrientes que tengan un tercer armónico débil y múltiplos del tercer armónico también pequeños, originados por las desigualdades en las características de excitación de los tres transformadores. Corrientemente, sólo aparecen armónicos impares.

1b. *Quintos armónicos.* Las formas de onda de las corrientes que circulan por el triángulo y por la línea no sólo difieren en que las primeras tienen tercer armónico y las segundas no (para transformadores exactamente iguales), sino también por una segunda razón que concierne a los efectos del quinto armónico de las corrientes de excitación. En el ejemplo del apartado 10 del capítulo VI, la intensidad eficaz del quinto armónico es aproximadamente igual al 10 % de la intensidad eficaz de la corriente de excitación y el quinto armónico se suma al valor de pico. En la figura 3a pueden verse dos corrientes picudas iguales,  $i_{CA}$  e  $i_{AB}$  que contienen quintos armónicos. Como  $i_{AB}$  está retrasada respecto a  $i_{CA}$  en un tercio de período, el quinto armónico de  $i_{AB}$  está retrasado respecto al quinto armónico de  $i_{CA}$  en cinco tercios de período de los quintos armónicos, como se indica en la figura 3a. Esto equivale a un retraso de dos tercios, o a un *adelanto* de un tercio de período del quinto armónico.

► Así pues, el orden de fases para los quintos armónicos es el *inverso* del orden de fases para los armónicos fundamentales \*\*. Es decir, cuando el armónico fundamental  $i_{AB1}$  está *retrasado* respecto al armónico fundamental  $i_{CA1}$  en un tercio de su período, el quinto armónico  $i_{AB5}$  está *adelantado* respecto al quinto armónico  $i_{CA5}$  en un tercio de su período de quinto armónico. En las figuras 3b y 3c pueden verse estas relaciones de fase representadas vectorialmente. ◀

\* En el apartado 10 del capítulo VI se vio que la corriente de excitación de un transformador normal para sistema de potencia debe tener un tercer armónico cuya intensidad es alrededor del 40 % de la del armónico fundamental, cuando el flujo varía sinusoidalmente.

\*\* En la terminología de las componentes simétricas, los quintos armónicos son corrientes de secuencia negativa.

Si las corrientes  $i_{AB}$  e  $i_{CA}$  están constituidas por los armónicos fundamental y quinto de las corrientes de excitación de dos de los transformadores conectados en triángulo, la corriente  $i_A$  que circula por la línea es su diferencia, según indica la

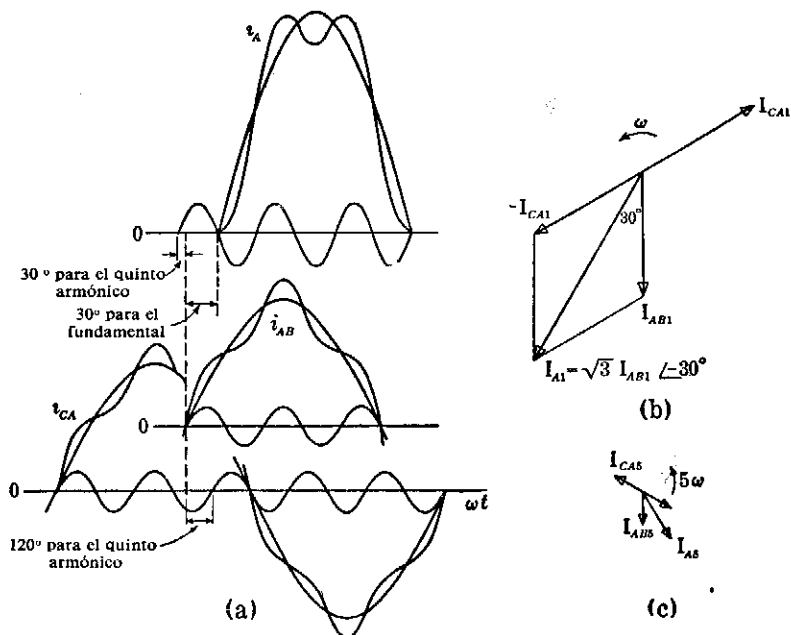


FIG. 3. Corrientes en la línea y en el triángulo que contienen quintos armónicos; a) formas de onda, b) diagrama vectorial de los armónicos fundamentales, c) diagrama vectorial de los quintos armónicos

ecuación (1). En los diagramas vectoriales puede verse que el armónico fundamental de la corriente de línea  $i_A$  tiene una intensidad  $\sqrt{3}$  veces mayor que el armónico fundamental de las corrientes en el triángulo y está *retrasado* respecto al armónico fundamental de  $i_{AB}$  en  $30^\circ$ , o sea, un doceavo de período, mientras el quinto armónico de  $i_A$  es  $\sqrt{3}$  veces mayor que el quinto armónico de las corrientes del triángulo, pero está *adelantado* respecto al quinto armónico de  $i_{AB}$  en  $30^\circ$  del quinto armónico, es decir, en un doceavo del período del quinto armónico. Así pues, el defasaje entre armónicos fundamental y quinto de las corrientes de línea es diferente del defasaje entre dichas componentes de las corrientes del triángulo y, aun cuando las corrientes de la línea y del triángulo contengan los armónicos fundamental y quinto en la misma proporción, sus formas de onda son diferentes a causa de la rotación de fase. Las corrientes en el triángulo son ondas picudas mientras que las corrientes en la línea son ondas con cumbre doble, según se indica en las figuras 1 y 3a.

1c. *Resumen de los defasajes entre armónicos.* Puede verse fácilmente que el orden de fases de los armónicos fundamental, cuarto, séptimo, etc., en un circuito trifásico es el mismo; que el orden de fases de los armónicos segundo, quinto, octavo, undécimo, etc., es el inverso del orden de fases de los armónicos fundamentales; y

que los armónicos tercero, sexto, noveno, etc., están en concordancia de fase. Si es  $ABC$  el orden de las fases de los armónicos fundamentales, estos hechos se resumen en la tabla siguiente, la cual no sólo es aplicable a los armónicos de las ondas de corriente, sino también a los armónicos de las tensiones. Corrientemente sólo existen armónicos impares.

DEFASAJES ENTRE LOS ARMÓNICOS EN CIRCUITOS TRIFÁSICOS

<i>Armónicos</i>	<i>Orden de las fases</i>
1, 4, 7, 10, 13, etc.	$ABC$ (secuencia positiva)
2, 5, 8, 11, 14, etc.	$CBA$ (secuencia negativa)
3, 6, 9, 12, 15, etc.	en fase (secuencia cero)

*Id.* *Intensidades eficaces de las corrientes en el triángulo y en la línea.* Debido a la ausencia de terceros armónicos en las corrientes de línea, la intensidad eficaz de las corrientes de línea en vacío no es  $\sqrt{3}$  por la intensidad eficaz de la corriente de excitación de los transformadores conectados en triángulo, sino que es menor. Así pues, si  $I_{\varphi_1}$ ,  $I_{\varphi_3}$ , etc., son las intensidades eficaces de los armónicos en los tres transformadores exactamente iguales, la intensidad eficaz  $I_{\varphi_A}$  de las corrientes de excitación de los transformadores es:

$$I_{\varphi_A} = \sqrt{I_{\varphi_1}^2 + I_{\varphi_3}^2 + I_{\varphi_5}^2 + \dots} \quad (2)$$

Como las intensidades eficaces de los armónicos de la corriente de línea son  $\sqrt{3}$  veces mayores que las intensidades de los armónicos correspondientes en las corrientes del triángulo, pero en la corriente de línea no existen ni el tercer armónico ni armónicos de orden múltiplo del tercero, la intensidad eficaz  $I_{\varphi \text{ línea}}$  de las corrientes de línea es:

$$I_{\varphi \text{ línea}} = \sqrt{3} \sqrt{I_{\varphi_1}^2 + 0 + I_{\varphi_5}^2 + \dots} \quad (3)$$

Si se desprecian los armónicos de orden múltiplo del tercero,

$$I_{\varphi \text{ línea}} = \sqrt{3} \sqrt{I_{\varphi_A}^2 - I_{\varphi_3}^2} \quad (4)$$

En el ejemplo del apartado 10 del capítulo VI, la intensidad eficaz del tercer armónico era el 41,5 % de la de la corriente de excitación del transformador. Así pues, si se conectan en triángulo tres de dichos transformadores, la corriente en la línea sería:

$$\begin{aligned} I_{\varphi \text{ línea}} &= \sqrt{3} \sqrt{I_{\varphi_A}^2 - (0,415 I_{\varphi_A})^2} \\ &= I_{\varphi_A} \sqrt{3} \sqrt{1 - 0,415^2} \\ &= 0,91 \sqrt{3} I_{\varphi_A} \end{aligned} \quad (5)$$

Es decir, como en el triángulo hay terceros armónicos pero no en las líneas, la razón de las intensidades de las corrientes de línea a las de las corrientes de las fases en triángulo es menor que el valor  $\sqrt{3}$  aplicable a corrientes sinusoidales. Aun cuando

este efecto de los terceros armónicos de las corrientes rara vez tiene mucha importancia práctica y a menudo se desprecia, explica ciertos fenómenos que a primera vista pudieran parecer enigmáticos. Por ejemplo, cuando tres transformadores iguales se conectan en triángulo a una línea trifásica equilibrada y se miden las tensiones e intensidades de la línea, la potencia trifásica de excitación  $\sqrt{3} V_{línea} I_{línea}$  es menor que el triple de los volt-ampere de excitación de un sólo transformador que se obtendrían en un ensayo monofásico a la misma tensión. Sin embargo, la potencia trifásica de entrada total debe ser la suma de las pérdidas en los núcleos de los tres transformadores. Así pues, el factor de potencia trifásico en vacío de un banco conectado en triángulo es superior en un pequeño tanto por ciento al factor de potencia monofásico en vacío de las unidades.

*Ie. Conexiones triángulo-estrella y triángulo-triángulo.* Los terceros armónicos de las corrientes de excitación de los primarios conectados en triángulo originan caídas de tensión de la frecuencia del tercer armónico en la impedancia de fuga de cada transformador. Como la tensión sinusoidal aplicada es igual a la caída de tensión debida a la impedancia de fuga del primario más la fuerza contraelectromotriz generada por el flujo mutuo, esta fuerza electromotriz debe contener un tercer armónico igual y opuesto al tercer armónico de la caída de tensión en la impedancia de fuga y, en consecuencia, el flujo mutuo debe ajustarse por sí mismo de manera que genere esta pequeña tensión del tercer armónico, la cual suele ser solamente de un 0,1 % de la tensión nominal. Por tanto, en los secundarios se generará también una pequeña fuerza electromotriz de la frecuencia del tercer armónico. Como las formas de onda de las fuerzas electromotrices generadas en los tres transformadores iguales son iguales pero defasadas un tercio de período, los terceros armónicos de las fuerzas electromotrices de los secundarios de los tres transformadores serán iguales y defasadas tres tercios de período del tercer armónico, y por tanto están en concordancia de fase.

Si se conectan los secundarios en estrella con el neutro aislado, los terceros armónicos de la corriente de excitación necesarios para permitir que las variaciones casi sinusoidales de los flujos mutuos queden confinadas a los primarios en triángulo y las caídas de tensión en la impedancia de fuga de los primarios, aparecen como pequeñas componentes de las tensiones de los secundarios respecto al neutro pero, según se ve en el apartado 2d, estos terceros armónicos no se hallan presentes en las tensiones entre línea y línea.

Sin embargo, si se conectan en triángulo los secundarios, los terceros armónicos de las tres tensiones de secundario están en fase en el mismo sentido a lo largo del triángulo y por tanto producen una débil corriente de la frecuencia del tercer armónico en el triángulo de secundarios. Así pues, los terceros armónicos de las corrientes de excitación se encuentran tanto en los primarios como en los secundarios en triángulo, y las fuerzas magnetomotrices de la frecuencia del tercer armónico necesarias para permitir las variaciones casi sinusoidales de los flujos mutuos las crean los efectos combinados de estas corrientes de excitación de los primarios y de los secundarios. Puede demostrarse que las intensidades de los terceros armónicos de las corrientes de excitación en los triángulos de primarios y de secundarios son inversamente proporcionales a las impedancias de fuga de primario y secundario a la frecuencia del tercer armónico, estando referidas a un mismo lado las intensidades y las impedancias.

## 2. PRIMARIOS CONECTADOS EN ESTRELLA

Puesto que, según se vio en el apartado 2 del capítulo XXI, las características de la conexión en estrella se hallan muy influidas por el aislamiento del neutro de los primarios, el estudio que sigue se subdivide según que el neutro del primario esté aislado o conectado al neutro del generador y según que los secundarios estén conectados en estrella o en triángulo.

En determinadas circunstancias, las corrientes que circulan por una línea trifásica de potencia pueden inducir tensiones nocivas en circuitos paralelos de comunicaciones. En este apartado se incluye un estudio breve de dicha interferencia inductiva, porque las corrientes perjudiciales que circulan por las líneas de potencia suelen ser los terceros armónicos de las corrientes de excitación, generados en los devanados en estrella de transformadores cuyo neutro está conectado al neutro de algún otro sistema.

2a. *Conexión estrella-estrella: Neutro de primarios conectado al neutro del generador.* Consideremos, en primer lugar, el ejemplo sencillo de un banco estrella-estrella de tres transformadores monofásicos exactamente iguales cuyos secundarios estén en circuito abierto. El neutro de los primarios está conectado al neutro de un generador trifásico conectado en estrella cuyas tensiones son sinusoidales y están equilibradas, como se indica en la figura 4a. En la figura 4b pueden verse los oscilo-

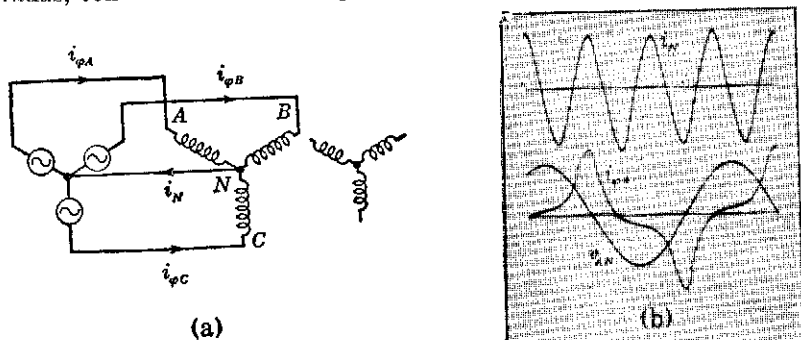


FIG. 4. Banco estrella-estrella de transformadores; a) conexiones, y b) oscilogramas de la tensión  $V_{AN}$  del primario respecto al neutro, de la corriente de excitación  $i_{\psi A}$  y de la corriente  $i_N$  que circula por el neutro de los primarios

gramas de la tensión  $v_{AN}$  aplicada a uno de los transformadores, de la corriente  $i_{\psi A}$  de excitación de este transformador y de la corriente  $i_N$  que circula por el hilo neutro. Cuando la tensión aplicada es sinusoidal, la corriente de excitación sólo contiene armónicos impares, siendo el tercero el más importante de los superiores. Si son iguales los tres transformadores y están equilibradas las tensiones, las corrientes de excitación  $i_{\psi A}$ ,  $i_{\psi B}$  o  $i_{\psi C}$  son iguales salvo en la fase, pues están defasadas en  $120^\circ$ .

La corriente que circula por el hilo neutro  $N$  es la suma de las corrientes  $i_{\psi A}$ ,  $i_{\psi B}$  e  $i_{\psi C}$ . Cuando los transformadores son iguales y las tensiones están equilibradas, los armónicos fundamentales de las tres corrientes de excitación son tres ondas sinusoidales de igual amplitud defasadas  $120^\circ$ ; su suma es, pues, nula y por tanto, por el hilo neutro no circula ninguna corriente de frecuencia igual a la fundamental. En cambio, los terceros armónicos de las tres corrientes de excitación están en con-

cordancia de fase (según se vio en el apartado 1a), por lo que el tercer armónico de la corriente que circula por el hilo neutro tiene una intensidad triple de la de los terceros armónicos de las corrientes de excitación de los transformadores.

En la tabla del apartado 1c puede verse que solamente están en fase los terceros armónicos y los de orden múltiplo del tercero; todos los demás armónicos de las tres corrientes de excitación están defasados 120°.

► Por tanto, cuando los transformadores son iguales y están equilibradas las tensiones, la corriente que circula por el neutro sólo contiene los armónicos impares de frecuencias múltiplos de la del tercero. Los armónicos a partir del noveno suelen ser muy débiles, por lo que la corriente que circula por el neutro es aproximadamente una onda sinusoidal de frecuencia triple cuya intensidad eficaz es aproximadamente igual al triple de la intensidad eficaz del tercer armónico de las corrientes de excitación de los transformadores. ◀

En el oscilograma de la figura 4b puede verse este hecho. La pequeña componente de frecuencia fundamental de la corriente  $i_N$  que circula por el neutro se debe a pequeñas desigualdades entre las características de excitación de los tres transformadores.

Los terceros armónicos de las corrientes de excitación producen pequeñas caídas de tensión de la frecuencia del tercer armónico en las impedancias de fuga de los primarios de los transformadores y por tanto, cuando varían sinusoidalmente las tensiones respecto al neutro aplicadas a los primarios, las fuerzas electromotrices inducidas por el flujo mutuo contienen terceros armónicos débiles. Estos aparecen como componentes pequeñas de las tensiones de los secundarios respecto al neutro si bien no se hallan presentes en las tensiones entre línea y línea de los secundarios, según se ve en la parte d) de este apartado.

Para mantener un sentido de la proporción adecuado, convendrá hacer un comentario acerca del orden de magnitud de las corrientes de excitación. La corriente de excitación en un transformador ordinario para sistemas de potencia suele ser un 5 % de la intensidad nominal y como el tercer armónico es un 40 % de la corriente de excitación, resulta ser un  $0,4 \times 5$ , ó sea un 2 % de la intensidad nominal. La corriente que circula por el neutro tiene, pues, una intensidad del mismo orden de magnitud que las corrientes de excitación que circulan por los tres hilos de la línea, siendo todas estas intensidades iguales solamente a un pequeño tanto por ciento de la intensidad nominal.

Aun cuando las características de un banco estrella-estrella suelen ser satisfactorias cuando se conecta el neutro de los primarios al neutro del generador, los terceros armónicos de las corrientes de línea resultantes de esta conexión pueden ocasionar una interferencia inductiva molesta en los circuitos de comunicaciones paralelos según se verá a continuación.

2b. *Interferencia inductiva ocasionada por el tercer armónico de las corrientes de excitación.* Aun cuando la intensidad eficaz del tercer armónico de la corriente de excitación suele ser solamente un 2 % de la intensidad nominal a plena carga de las corrientes de línea, el efecto inductivo de las corrientes de excitación sobre un circuito de comunicaciones paralelo al circuito de potencia puede ser mayor que el efecto de las corrientes trifásicas equilibradas de plena carga que circulan por las líneas de potencia. Por ejemplo, consideremos la figura 5 en la que puede



verse la línea de potencia trifásica  $ABC$  y una línea telefónica  $ab$  descubierta. Para mayor sencillez, supondremos que ambos circuitos están en un mismo plano. Los sentidos de las corrientes en la línea de potencia los supondremos positivos hacia afuera del observador, tal como indican las aspas que representan las colas de flechas dirigidas en el sentido positivo. Las corrientes que circulan por la línea de potencia crean un campo magnético que abraza al circuito de comunicación y que está representado por el vector  $B$  inducción magnética resultante, que es la suma de las componentes creadas por cada corriente actuando por su cuenta. Según la ley de Biot y Savart, las inducciones magnéticas componentes son proporcionales a las intensidades instantáneas  $i_A, i_B, i_C$  de las corrientes e inversamente proporcionales a las distancias  $x_A, x_B, x_C$  de los conductores de la línea de potencia hasta el punto en cuestión; así,

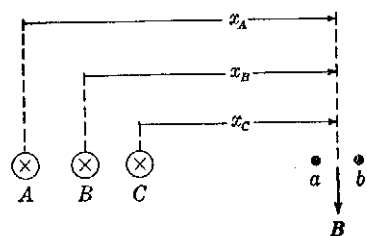


FIG. 5. Circuitos paralelos de potencia y de comunicaciones

$$B = \mu_0 \left( \frac{2i_A}{x_A} + \frac{2i_B}{x_B} + \frac{2i_C}{x_C} \right), \quad (6)$$

donde  $\mu_0$  es la permeabilidad del vacío. Esta ecuación es válida para cualquier sistema de unidades no racionalizado. El flujo que abraza al circuito de comunicación es la integral extendida al área encerrada por los dos hilos de comunicación, de la inducción magnética  $B$ .

Si están equilibradas las corrientes de la línea de potencia, las corrientes sinusoidales defasadas en  $120^\circ$  (tales como los armónicos fundamentales, quinto, séptimo, etcétera de las corrientes trifásicas equilibradas) dan una suma nula en todo instante y si fueran iguales las distancias  $x_A, x_B, x_C$  de los tres hilos de fase al circuito de comunicación, la suma de las inducciones magnéticas creadas por las corrientes también sería nula. Es decir, las inducciones magnéticas componentes creadas por las corrientes de fase tienden a contrarrestarse entre sí, dependiendo la inducción magnética resultante de las diferencias entre las distancias  $x_A, x_B$  y  $x_C$ . La inducción magnética resultante creada por los armónicos equilibrados fundamental, quinto, séptimo, etc., de las corrientes de la línea de potencia es, pues, relativamente pequeña cuando las distancias  $x_A, x_B, x_C$  son grandes frente a las separaciones entre conductores de la línea de potencia.

No obstante, si la línea de potencia suministra la excitación a un banco estrella-estrella de transformadores cuyo neutro de los primarios está conectado al neutro del generador, las corrientes que circulan por la línea de potencia contienen terceros armónicos. Para mayor sencillez, supongamos que la conexión entre los neutros se realiza a través del suelo y que el efecto inductivo del tercer armónico de la corriente de tierra es despreciable debido a la altura  $a$  que se encuentran sobre el suelo los circuitos. Los terceros armónicos de las tres corrientes de línea están en fase y por tanto los valores instantáneos de las inducciones magnéticas debidas a los terceros armónicos se suman directamente\*. Por tanto, terceros armónicos relativa-

\* Esto es también cierto para inducciones magnéticas componentes creadas en determinadas condiciones de desequilibrio, tales como la ilustrada a la derecha de la avería de la figura 3

mente débiles de las corrientes trifásicas pueden enviar a través del circuito de comunicación un flujo mayor que el debido a los armónicos fundamentales equilibrados, mucho más intensos. Además, la variación en unidad de tiempo del flujo del tercer armónico es triple que la variación del flujo del armónico fundamental y por tanto la tensión de frecuencia triple inducida en el circuito de comunicación por un flujo dado del tercer armónico es tres veces mayor que la tensión de frecuencia fundamental que induciría un flujo fundamental igual. Además, la respuesta de un receptor telefónico y del oído a una señal de frecuencia triple de la fundamental de un sistema ordinario de potencia es mayor que la respuesta a una señal de frecuencia fundamental de igual intensidad. Todos estos factores tienden a que la interferencia inductiva debida a terceros armónicos relativamente débiles de la línea de potencia sea más perjudicial que la interferencia debida a armónicos fundamentales equilibrados mucho más intensos.

Cuando sea necesario exponer un circuito de comunicación al aire libre a los efectos inductivos de una línea de potencia, puede reducirse la interferencia trasponiendo adecuadamente la línea de comunicación. También es conveniente emplear conexiones de los transformadores del sistema de potencia que no permitan la circulación de los terceros armónicos de las corrientes de excitación por el circuito de potencia. Por todo lo anterior, pueden no resultar convenientes los primarios conectados en estrella con su neutro conectado al del generador.

2c. *Conexión estrella-triángulo.* Consideremos un banco de tres transformadores iguales cuyos primarios estén conectados en estrella y cuyos secundarios estén conectados en serie a punto para conectar en triángulo, tal como se indica en la figura 6; es decir, el triángulo está abierto por un vértice. El neutro de los primarios se conecta al neutro de un generador de tensiones sinusoidales trifásicas conectado en estrella. En el lado de los primarios, el banco se comporta de igual manera que el banco en estrella-estrella estudiado en la parte a) de este apartado; es decir, las tensiones de los primarios varían sinusoidalmente, cada transformador recibe su corriente de excitación de las líneas de los primarios y los terceros armónicos de las corrientes de excitación regresan al generador por el hilo neutro, teniendo las formas de onda indicadas por los oscilogramas de la figura 4b.

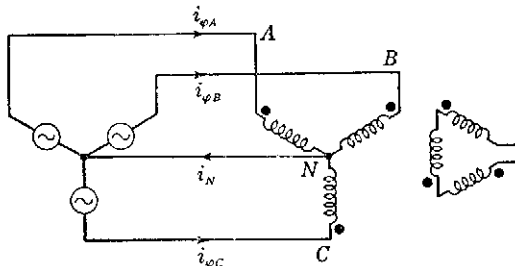


Fig. 6. Banco estrella-triángulo de transformadores con el triángulo abierto por un vértice

Los terceros armónicos de las corrientes de excitación crean pequeñas caídas de tensión de la frecuencia de los terceros armónicos en las impedancias de fuga de los transformadores y por tanto las fuerzas electromotrices inducidas por el flujo mutuo contienen terceros armónicos débiles que aparecen como componentes pequeñas de las tensiones de los secundarios de los transformadores. Como las fuerzas

del capítulo XXIV, donde las corrientes de línea tienen igual intensidad y están en fase. En el análisis de circuitos trifásicos por el método de las componentes simétricas, dichas corrientes reciben el nombre de componentes de secuencia cero. Véase el apartado 4 del capítulo XXIV.

electromotrices de la frecuencia de los terceros armónicos están en fase en los tres transformadores, la tensión en el vértice abierto del triángulo de secundarios contiene un tercer armónico triple de la fuerza electromotriz inducida en cada secundario con la frecuencia del tercer armónico. Como los armónicos fundamentales, quinto, séptimo, etc., de las tensiones en los tres secundarios son de igual magnitud y están desfasados  $120^\circ$ , sus sumas son nulas y por tanto entre los extremos del vértice del triángulo no existirán tensiones de estas frecuencias. Luego, si se desprecian los armónicos de orden superior al séptimo, la tensión en el vértice abierto del triángulo de secundarios será el triple de la fuerza electromotriz de la frecuencia del tercer armónico generada en cada secundario, cuando sean iguales los transformadores y las tensiones aplicadas estén equilibradas. Aun cuando esta tensión de la frecuencia del tercer armónico suele ser muy pequeña frente a las tensiones de secundario entre los terminales de cada transformador, cuando se cierra el triángulo, las fuerzas electromotrices de secundario de la frecuencia del tercer armónico tienen un efecto importante sobre los fenómenos de excitación. Vamos a estudiar esto.

Si cerramos el triángulo de secundarios, las fuerzas electromotrices de los secundarios de la frecuencia del tercer armónico crean una corriente de dicha frecuencia que circula por el triángulo de secundarios. La acción combinada de las corrientes de excitación de la frecuencia del tercer armónico que circulan por primario y secundario crean las fuerzas magnetomotrices de la frecuencia del tercer armónico necesarias para permitir variaciones casi sinusoidales del flujo en los tres transformadores, como ocurre en la conexión triángulo-triángulo estudiada en el apartado 1e, por lo que al cerrar el triángulo de secundarios, se reducen los terceros armónicos de las corrientes de los primarios.

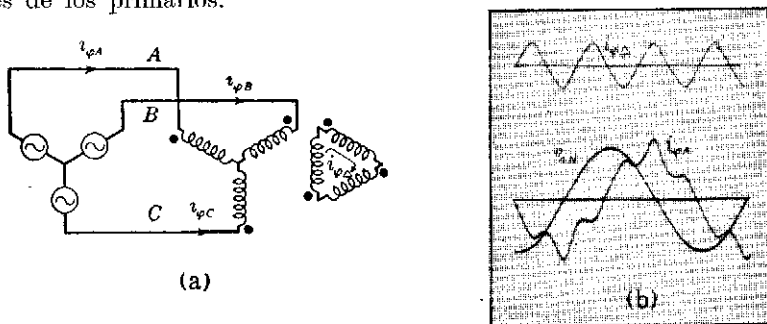


FIG. 7. Banco estrella-triángulo con neutro aislado; a) conexiones, y b) oscilogramas de la tensión  $v_{AN}$  respecto al neutro, corriente de excitación  $i_{pA}$  y corriente de excitación  $i_{sA}$  en el triángulo de secundarios

Si se cierra el triángulo de secundarios y se desconecta el hilo neutro, como en la figura 7a, las formas de onda de la tensión  $v_{AN}$  respecto al neutro, de la corriente de excitación  $i_{pA}$  en uno de los primarios y la corriente de excitación  $i_{sA}$  en el triángulo de secundarios son las indicadas por los oscilogramas de la figura 7b. Los terceros armónicos de las corrientes de los primarios ya no pueden existir, por estar interrumpido su camino de retorno por el hilo neutro. Así, pues, la forma de onda de la corriente de excitación  $i_{pA}$  de la figura 7b es distinta de la forma de onda de  $i_{pA}$  de la figura 4b, siendo su diferencia principal la ausencia de terceros armónicos

cuando está aislado el neutro de la estrella. El triángulo cerrado de secundarios, en cambio, proporciona un camino para los terceros armónicos de las corrientes, y las componentes de la frecuencia del tercer armónico de las fuerzas magnetomotrices necesarias para permitir las variaciones casi sinusoidales de los flujos mutuos las proporciona la corriente de excitación  $i_{q\Delta}$  de la frecuencia del tercer armónico que circula por el triángulo de secundarios. Como para crear esta corriente de frecuencia del tercer armónico en el triángulo es necesaria una fuerza electromotriz de dicha frecuencia, el flujo mutuo se ajustará por sí mismo para contener el tercer armónico requerido para generar esta pequeña fuerza electromotriz de secundario de la frecuencia del tercer armónico. Por tanto, el flujo mutuo induce un tercer armónico de la tensión respecto al neutro del lado del primario pero, por lo general, este tercer armónico de la tensión es muy pequeño y la forma de onda de la tensión del primario respecto al neutro permanece esencialmente sinusoidal, según se ve en el oscilograma de  $v_{AN}$  en la figura 7b.

De este estudio y del de las conexiones triángulo-estrella y triángulo-triángulo realizado en el apartado 1e, es posible sacar una conclusión importante referente a los efectos sobre los fenómenos de excitación de los devanados conectados en triángulo.

► Las corrientes de excitación de la frecuencia del tercer armónico necesarias para una variación sinusoidal del flujo circulan por los devanados conectados en triángulo de un banco triángulo-triángulo, triángulo-estrella o 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 en estrella de los otros sistemas de neutros.◄

En cambio, las corrientes de excitación de la frecuencia del tercer armónico están presentes en las líneas que alimentan un banco estrella-estrella cuyo neutro de los primarios se conecta al del generador, y por tanto este montaje puede originar una interferencia inductiva perjudicial. Si, aislando los neutros de un banco estrella-estrella, se eliminan de las líneas las corrientes de excitación de la frecuencia del tercer armónico, las tensiones respecto al neutro pueden sufrir una gran distorsión, según veremos en lo que sigue.

2d. *Conexión estrella-estrella con neutros aislados.* El estudio que vamos a realizar es aplicable a un banco de tres transformadores monofásicos conectados en estrella-estrella. En el apartado I del capítulo XXVI se ve que un transformador trifásico del tipo acorazado tiene esencialmente las mismas características que un banco de tres transformadores monofásicos y por tanto el estudio también será aplicable a la conexión estrella-estrella de unidades trifásicas del tipo acorazado. En cambio, el estudio *no es* aplicable a un transformador trifásico del tipo de núcleo conectado en estrella-estrella; sus características de excitación, estudiadas en el apartado 2a del capítulo XXVI son marcadamente diferentes de las de un banco de tres transformadores monofásicos conectados en estrella-estrella.

La conexión estrella-estrella de transformadores monofásicos sólo se empleará tras un estudio concienzudo de las condiciones en que ha de trabajar el banco, ya que la conexión tiene características que en determinadas circunstancias pueden ser perjudiciales e incluso peligrosas. Estas características se estudian a continuación.

Consideremos un banco estrella-estrella de transformadores monofásicos con

neutros aislados, excitados por un generador trifásico equilibrado cuyas tensiones tienen forma de onda sinusoidal. Supongamos que el banco no está alimentado a ninguna carga. Las conexiones son las de la figura 8a.

Como el neutro de los primarios está aislado del neutro del generador, la suma instantánea de las corrientes de excitación suministradas al banco ha de ser nula; es decir, la corriente de excitación suministrada a un transformador cualquiera ha de encontrar su camino de retorno al generador a través de los primarios de los otros transformadores. Según se vio en el apartado 2b del capítulo XXI, el resultado de esta interdependencia de las corrientes de excitación entre sí es que las tensiones en los transformadores están determinadas por sus características de excitación. Como tres transformadores tienen rara vez características de excitación exactamente iguales, aun cuando sean del mismo diseño, las tensiones respecto al neutro suelen estar más o menos desequilibradas, aun cuando estén equilibradas las tensiones entre línea y línea. Esta situación no es conveniente.

El neutro aislado tiene también un efecto importante sobre los armónicos de la corriente de excitación. Para este estudio, supongamos que los transformadores tengan características de excitación exactamente iguales. En tal caso, las corrientes de excitación suministradas a los transformadores tendrán la misma intensidad y forma de onda, pero estarán desfasadas un tercio de período. Por tanto, los terceros armónicos de las tres corrientes de excitación, si existieran, estarían en concordancia de fase y su suma *no* sería nula.

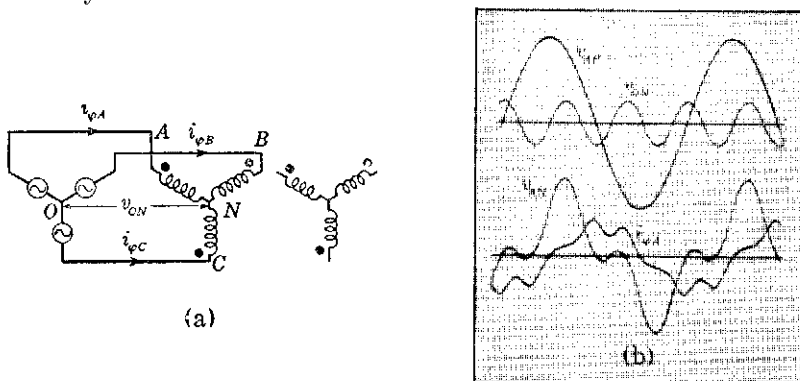


FIG. 8. Banco de transformadores monofásicos en estrella-estrella; a) conexiones, y b) oscilogramas de la tensión  $v_{AB}$  entre línea y línea, la tensión  $v_{AN}$  respecto al neutro, la corriente de excitación  $i_{\varphi A}$  y la tensión  $v_{ON}$  entre el neutro  $O$  del generador y el neutro  $N$  de los primarios

► No obstante, como la suma de las intensidades instantáneas de las corrientes de excitación *debe* ser siempre nula a causa del neutro aislado, en las corrientes de excitación no podrán haber armónicos terceros ni de orden múltiplo del tercero y por tanto la forma de onda de la corriente de excitación en cada transformador es diferente de la forma de onda que se requiere para crear una variación sinusoidal del flujo en su núcleo. ◀

El oscilograma de  $i_{\varphi A}$  en la figura 8b es un ejemplo ordinario de forma de onda de las corrientes de excitación en un banco estrella-estrella con neutro aislado. Es

interesante comparar esta forma de onda con la de la corriente de excitación para flujo variable sinusoidalmente, representada en la figura 9 del capítulo VI. Cuando la variación de flujo es sinusoidal, la forma de onda de la corriente de excitación presenta un pico muy agudo, correspondiendo el pico de intensidad al instante en que se dobla el ciclo de histeresis en sus extremos. Este pico agudo de la corriente de excitación es causa del tercer armónico relativamente intenso de la corriente de excitación correspondiente a una variación sinusoidal del flujo. Cuando se suprime este tercer armónico por estar aislado el neutro de la estrella, se reduce la intensidad de pico de la corriente de excitación y la onda presenta frecuentemente una doble cumbre, como en la figura 8b. La doble cumbre se debe principalmente a la presencia de quintos armónicos. Es interesante señalar que la doble cumbre de la onda de corriente de excitación indica un lacito del ciclo de histeresis que penetra en él cerca de sus extremos. Obsérvese que al aislar el neutro de los primarios sólo se suprimen los armónicos tercero y de frecuencias múltiples de la de él. Todos los restantes armónicos de las tres corrientes de excitación podrán circular, ya que están defasados en 120° y sus sumas son nulas.

► Como para una variación sinusoidal de flujo es necesario un tercer armónico de la corriente de excitación, la supresión de estos terceros armónicos de la corriente de excitación evita que el flujo varíe sinusoidalmente e introduce en los flujos en el núcleo terceros armónicos que inducen terceros armónicos en las tensiones de primario y secundario de cada transformador. A inducciones magnéticas ordinarias en el núcleo, estos terceros armónicos de las tensiones suelen ser de un 30 a un 70 % del armónico fundamental de la tensión respecto al neutro. Luego, aun cuando varíen sinusoidalmente las tensiones aplicadas a los terminales de la línea, la forma de onda de las tensiones respecto al neutro no será sinusoidal cuando el neutro del banco esté aislado del neutro del generador. ◀

Como las relaciones entre las tensiones instantáneas entre línea y línea y entre línea y neutro son:

$$v_{AB} = v_{AN} - v_{BN} \quad (7)$$

$$v_{BC} = v_{BN} - v_{CN} \quad (8)$$

$$v_{CA} = v_{CN} - v_{AN}, \quad (9)$$

y como los terceros armónicos de las tres tensiones respecto al neutro y los armónicos de orden múltiplo del tercero están en concordancia de fase y tienen igual valor, las diferencias entre los terceros armónicos de dos tensiones respecto al neutro cualesquiera, tales como las que figuran en los segundos miembros de las ecuaciones (7), (8) y (9), son nulas en condiciones de equilibrio.

► Luego en las tensiones respecto al neutro podrán haber armónicos terceros y de órdenes múltiplos del tercero sin que estos armónicos se hallen presentes en las tensiones entre línea y línea. ◀

Sin embargo, en las tensiones entre línea y neutro no podrán aparecer otros armónicos, a menos que se hallen presentes también en las tensiones entre línea y línea. Luego, si están equilibradas las tensiones entre línea y línea y varían sinusoidalmente, las tensiones entre línea y neutro contienen armónicos fundamentales de

valor eficaz igual al producto de  $1/\sqrt{3}$ , ó sea 0,577 por el valor eficaz de las tensiones entre línea y línea y armónicos terceros y de órdenes múltiplos del tercero, cuyos valores eficaces están determinados por las características magnéticas no lineales del núcleo.

Si se desprecian los armónicos noveno y siguientes y se suponen tensiones entre línea y línea sinusoidales, el valor eficaz  $V_Y$  de las tensiones respecto al neutro es:

$$V_Y = \sqrt{V_{Y1}^2 + V_{Y3}^2} \quad (10)$$

donde  $V_{Y1}$  es la tensión eficaz del armónico fundamental y  $V_{Y3}$  es la tensión eficaz del tercer armónico. Este suele valer ordinariamente entre un 30 y un 70 % del armónico fundamental. Si, como valor representativo, se toma,

$$V_{Y3} = 0,50 V_{Y1}, \quad (11)$$

entonces,

$$V_Y = V_{Y1} \sqrt{1 + 0,25} = 1,12 V_{Y1} \quad (12)$$

$$= 1,12 \frac{V_{linea}}{\sqrt{3}}, \quad (13)$$

donde  $V_{linea}$  es el valor eficaz de las tensiones equilibradas entre línea y línea variables sinusoidalmente, y donde los transformadores se supone que tienen características de excitación exactamente iguales. Así, el valor eficaz de las tensiones respecto al neutro ya no es  $V_{linea}/\sqrt{3}$  como se obtendría si variaran sinusoidalmente las tensiones respecto al neutro, sino que es mayor que este valor.

Además, los valores máximos de los armónicos fundamental y tercero de las tensiones respecto al neutro se tienen, aproximadamente, en el mismo instante del ciclo. Por tanto, la forma de onda de las tensiones respecto al neutro presentará un pico agudo, según puede verse en el oscilograma de  $v_{AN}$  de la figura 8b. La tensión de pico en cada transformador es entre un 30 y un 70 % mayor que la tensión de pico del armónico y, por tanto, puede ser casi tan grande como el valor de pico de las tensiones entre línea y línea. Esta condición no es conveniente, ya que se aumentan los esfuerzos a que se somete el aislante debidos a la tensión, a causa de las tensiones de los terceros armónicos.

Cuando están equilibradas las tensiones del generador en estrella y varían sinusoidalmente, teniendo los transformadores características de excitación exactamente iguales, los terceros armónicos de las tensiones en los transformadores aparecen como tensiones de frecuencia triple entre el neutro del generador y el neutro de los primarios de los transformadores, según puede verse en el oscilograma de  $v_{ON}$  en la figura 8b. Si se pone a tierra el neutro del generador, entre el neutro de los primarios y tierra existe una tensión de frecuencia triple cuyo valor eficaz suele estar comprendido entre el 30 y el 70 % de la tensión entre línea y neutro. Si no se pone a tierra ni el neutro del generador ni el de los primarios, las tensiones entre las líneas y tierra y entre el neutro de los primarios y tierra están determinadas por las capacidades de las líneas a tierra y de los devanados del transformador a tierra.

► En determinadas circunstancias, los fenómenos de resonancia pueden incrementar en mucho los terceros armónicos de las tensiones. Esta condición peligrosa puede presentarse cuando se conecta el banco a una línea de transmisión o cable y está a tierra el punto neutro de los devanados de los transformadores, como se indica en la figura 9. ◀

Con esta conexión, el neutro del banco de transformadores se halla al potencial de tierra y por tanto, aun cuando las tensiones de la frecuencia del tercer armónico inducidas en cada transformador no se hallen presentes en las tensiones entre línea y línea, aparecen como terceros armónicos de las tensiones entre los hilos de la línea y tierra. Estas tensiones de la frecuencia del tercer armónico crean corrientes de

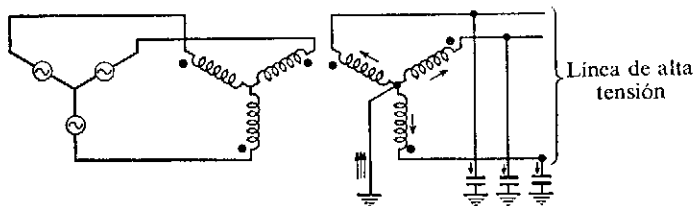


FIG. 9. Caminos de las corrientes de la frecuencia del tercer armónico creadas cuando se conecta un banco estrella-estrella con neutro a tierra a una línea de transmisión larga. Hay que evitar esta conexión, pues podrían desarrollarse por resonancia terceros armónicos excesivamente intensos

excitación de igual frecuencia en los circuitos constituidos por las capacidades a tierra de los hilos de la línea en serie con los devanados a tierra de los transformadores, tal como se muestra en la figura 9. Si las reactancias capacitivas para frecuencia triple de los hilos de la línea respecto a tierra son iguales a las reactancias magnetizantes para frecuencia triple de los transformadores, se estará en condiciones muy próximas a las de resonancia serie y los terceros armónicos de las tensiones entre línea y neutro pueden hacerse peligrosamente elevados. En estas circunstancias se han medido tensiones triples de la normal entre línea y neutro.

### 3. IGUALACIÓN DE LAS TENSIONES DE LOS NEUTROS EN LOS BANCOS ESTRELLA-ESTRELLA

A pesar de sus peculiaridades, hay ocasiones en que conviene la conexión estrella-estrella. A veces se emplean bancos estrella-estrella con neutros aislados, estando más o menos desequilibradas las tensiones respecto al neutro y no siendo sinusoidales sus formas de onda. Conectando el neutro de los primarios con el del generador pueden igualarse las tensiones respecto al neutro y eliminarse los terceros armónicos de las tensiones, pero la interferencia inductiva hace poco aconsejable esta disposición \*. Si no es aconsejable conectar el neutro de los primarios con el del generador, existen otras maneras de lograr los mismos resultados. Vamos a describir dos de ellas.

3a. *Transformadores de puesta a tierra en estrella-triángulo.* Los terceros armónicos de las tensiones respecto al neutro de un banco estrella-estrella pueden eliminarse prácticamente e igualarse las tensiones de los neutros disponiendo el

\* Véase el apartado 2b.



circuito de manera que puedan circular por los secundarios las corrientes de excitación necesarias para estos fines. Un método para lograr este resultado es el indicado en la figura 10, en donde se conecta a los terminales del banco estrella-estrella cuyas tensiones de los neutros se quieren igualar, un banco estrella-triángulo con el neutro de los primarios puesto a tierra. El neutro de los secundarios del banco estrella-estrella se conecta al neutro de los primarios del banco estrella-triángulo, bien poniendo a tierra ambos neutros o mejor mediante un hilo neutro como se indica

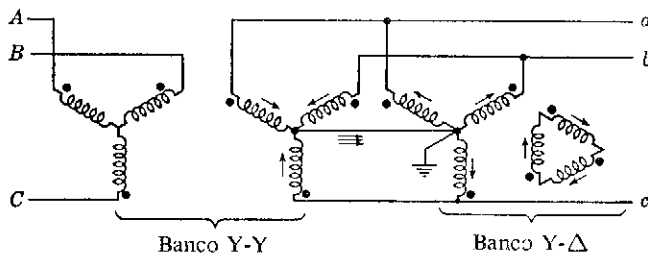


FIG. 10. Empleo de un banco estrella-triángulo de transformadores de puesta a tierra para igualar las tensiones de los neutros y eliminar los terceros armónicos de las tensiones en un banco estrella-estrella. Las flechas indican los circuitos para los terceros armónicos de las corrientes de excitación del banco estrella-estrella

en la figura 10. En este circuito, los terceros armónicos de las corrientes de excitación del banco estrella-estrella circulan por sus secundarios, estando indicados sus caminos en la figura 10. Cuando estas corrientes de frecuencia triple circulan por los primarios del banco estrella-triángulo, inducen corrientes de frecuencia triple en sus secundarios conectados en triángulo cuyas fuerzas magnetomotrices son casi iguales y opuestas a las fuerzas magnetomotrices de frecuencia triple de las corrientes que circulan por los primarios. Por tanto, la impedancia introducida por el banco estrella-triángulo y que se opone a la circulación de los terceros armónicos de las corrientes de excitación del banco estrella-estrella no es más que la impedancia equivalente a la frecuencia triple del banco estrella-triángulo referida a su primario, la cual es relativamente pequeña. Como estas corrientes de frecuencia triple son de igual intensidad y están en concordancia de fase (suponiendo exactamente iguales los transformadores del banco estrella-estrella), sólo circularán por el triángulo de secundarios del banco estrella-triángulo. Además de los terceros armónicos de las corrientes de excitación del banco estrella-estrella de la figura 10, circulan por los secundarios en triángulo del otro banco, en la forma normal descrita en el apartado 2c, los terceros armónicos de las corrientes de excitación de éste y las líneas suministran los armónicos fundamental, quinto, séptimo, etc., de las corrientes de excitación de ambos bancos.

A veces, el banco estrella-triángulo alimenta una segunda carga, pero otras no se conecta ninguna carga al triángulo y el único fin del banco estrella-triángulo es eliminar los terceros armónicos de las tensiones, igualar las tensiones respecto al neutro de uno o más bancos estrella-estrella y proporcionar una tierra al sistema exenta de los peligros debidos a la resonancia del tercer armónico. A veces, como transformadores de puesta a tierra se emplean autotransformadores conectados en zigzag, según se describe en el apartado 4a del capítulo XXV. Normalmente, los

transformadores de puesta a tierra están situados en la misma subcentral que el banco estrella-estrella.

Aun cuando en condiciones de equilibrio las únicas corrientes que circulan por los transformadores de puesta a tierra son sus propias corrientes de excitación más los terceros armónicos de las corrientes de excitación del banco estrella-estrella, por los transformadores de puesta a tierra podrán circular corrientes intensas en el caso de un cortocircuito entre línea y tierra. En esas condiciones, las corrientes que circulan por el banco estrella-triángulo son las indicadas en la figura 3 del capítulo XXIV. Por tanto, los transformadores de puesta a tierra deberán tener una capacidad de transporte de corriente suficiente para soportar los efectos de las averías debidas a puesta a tierra de una línea.

*3b. Conexión estrella-estrella-triángulo.* Los terceros armónicos de las tensiones respecto al neutro de un banco de transformadores monofásicos conectados en estrella-estrella se pueden reducir en gran manera y pueden igualarse las tensiones de los neutros si se añade a cada transformador un tercer devanado, llamado terciario, y se conectan estos devanados en triángulo, como se indica en la figura 11. Con esta disposición de los circuitos, los terceros armónicos de las corrientes de excitación necesarios para mantener las variaciones sinusoidales de los flujos en los núcleos podrán circular por el triángulo, como en la conexión estrella-triángulo descrita en el apartado 2c. La ventaja de este montaje es que los terceros armónicos de las corrientes de excitación no necesitan circular por las líneas en donde podrían ocasionar interferencia telefónica. Si las características de excitación de los transformadores no fueran exactamente iguales, el triángulo de terciarios proporciona también un circuito por el que puede circular una corriente de excitación monofásica, o de secuencia cero, para compensar las desigualdades de las características de excitación y evitar el desequilibrio de las tensiones respecto al neutro que, de otra manera, existiría en un banco estrella-estrella con neutros aislados.

El diseño de los devanados terciarios está determinado por las conexiones del sistema y los resultados que se espera obtener del triángulo de terciarios. Por ejemplo, si están aislados los neutros de los primarios y los secundarios y el triángulo de terciarios no alimenta a carga alguna, las únicas corrientes que pueden circular por los devanados terciarios son los terceros armónicos o corrientes de excitación de secuencia cero y en consecuencia, los devanados pueden ser relativamente finos. Sin embargo, el neutro de la estrella de alta tensión suele estar puesto a tierra, como en la figura 11, y a veces lo están ambos neutros. En estas condiciones las averías de puesta a tierra de las líneas de alta tensión pueden inducir corrientes muy intensas en los terciarios y éstos deberán poder soportar el calentamiento y las fuerzas mecánicas ocasionadas por ellas. A menudo, el triángulo de terciarios alimenta una carga; por ejemplo, circuitos auxiliares de una subcentral, o condensadores estáticos o síncronos para regulación del factor de potencia y de la tensión. En estas condiciones, el triángulo de terciarios debe poder soportar los efectos de cortocircuitos entre sus propios terminales. En el capítulo XXVII se realiza el estudio de los transformadores de tres devanados bajo carga.

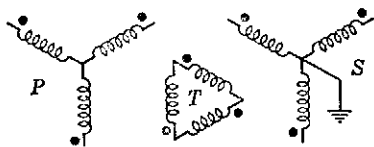


Fig. 11. Conexión estrella-estrella-triángulo.

#### 4. RESUMEN DE LOS FENÓMENOS DEBIDOS A LOS ARMÓNICOS

Los puntos importantes puestos de manifiesto en el estudio anterior de los fenómenos debidos a los armónicos en circuitos trifásicos equilibrados pueden resumirse de la manera siguiente:

Los terceros armónicos de corrientes y tensiones en los circuitos trifásicos equilibrados son iguales y están en concordancia de fase. (Es decir, son cantidades de secuencia cero.)

El orden de fases de los quintos armónicos es opuesto al de los armónicos fundamentales. (Es decir, son cantidades de secuencia negativa.)

Por estar en concordancia de fase, los terceros armónicos de las corrientes no pueden circular por las líneas de un sistema trifásico equilibrado, a menos que se les proporcione un camino de retorno a través de una conexión neutra. No obstante, por los circuitos conectados en triángulo pueden circular corrientes de la frecuencia del tercer armónico que no estén presentes en las líneas conectadas al triángulo.

Debido a que sus efectos inductivos son aditivos directamente, las corrientes de la frecuencia del tercer armónico (u otras de secuencia cero) que circulen por las líneas de un sistema trifásico pueden originar una interferencia inductiva importante en los circuitos de comunicaciones paralelos a las líneas de potencia.

Por deber ser nula la suma instantánea de las tensiones entre línea y línea de un sistema trifásico (tomadas en orden cíclico), en las tensiones entre línea y línea de un sistema trifásico equilibrado no podrán existir terceros armónicos, ya que estarían en concordancia de fase y por tanto su suma no sería nula. En cambio, pueden existir terceros armónicos en las tensiones de la estrella respecto al neutro, sin que estén presentes en las tensiones entre línea y línea.

Las características magnéticas del hierro exigen que para que el flujo varíe sinusoidalmente, la corriente de excitación de un transformador contenga un tercer armónico cuya intensidad es normalmente de un 40 % de la del armónico fundamental de la corriente de excitación.

Las aplicaciones de estos principios generales a las conexiones trifásicas de transformadores monofásicos conducen a las siguientes conclusiones:

Si las tensiones de los transformadores deben variar sinusoidalmente, deberá permitirse la circulación de los terceros armónicos de las corrientes, o por los devanados conectados en triángulo o a través de una conexión neutra\*.

Aun cuando las características de la conexión estrella-estrella con hilo neutro sean satisfactorias en lo que concierne al comportamiento del banco, la necesidad de un cuarto hilo es un inconveniente y la presencia de terceros armónicos de las corrientes de excitación en las líneas trifásicas puede ocasionar interferencia inductiva perjudicial.

Si se suprimen los terceros armónicos de las corrientes de excitación, como ocurre en la conexión estrella-estrella con neutros aislados, las tensiones de los neutros pueden desequilibrarse\*\* y contener terceros armónicos relativamente intensos. En determinadas condiciones, estos terceros armónicos de las tensiones

\* Téngase en cuenta que esto no vale para transformadores trifásicos del tipo de núcleo, como los estudiados en el apartado 2 del capítulo XXVI.

\*\* Véase el apartado 2b del capítulo XXI.

respecto al neutro pueden aumentar mucho a causa de los fenómenos de resonancia. Por ello, la conexión estrella-estrella de transformadores monofásicos deberá utilizarse con precaución.