

ARMÓNICOS EN LAS CORRIENTES DE VACÍO, EN LOS FLUJOS Y EN LAS TENSIONES

Miguel Angel Rodríguez Pozueta

Banco de 3 transformadores monofásicos o transformador trifásico de 5 columnas con conexión Yy en vacío

Consideremos un banco de tres transformadores monofásicos conectados en estrella-estrella y que esté en vacío. Como se ha visto al estudiar el comportamiento en vacío de los transformadores monofásicos, por cada uno de los transformadores monofásicos del banco tratará de circular una corriente de vacío no senoidal. Esto es debido a la relación no lineal que existe entre el flujo y la intensidad (dada por la curva de magnetización).

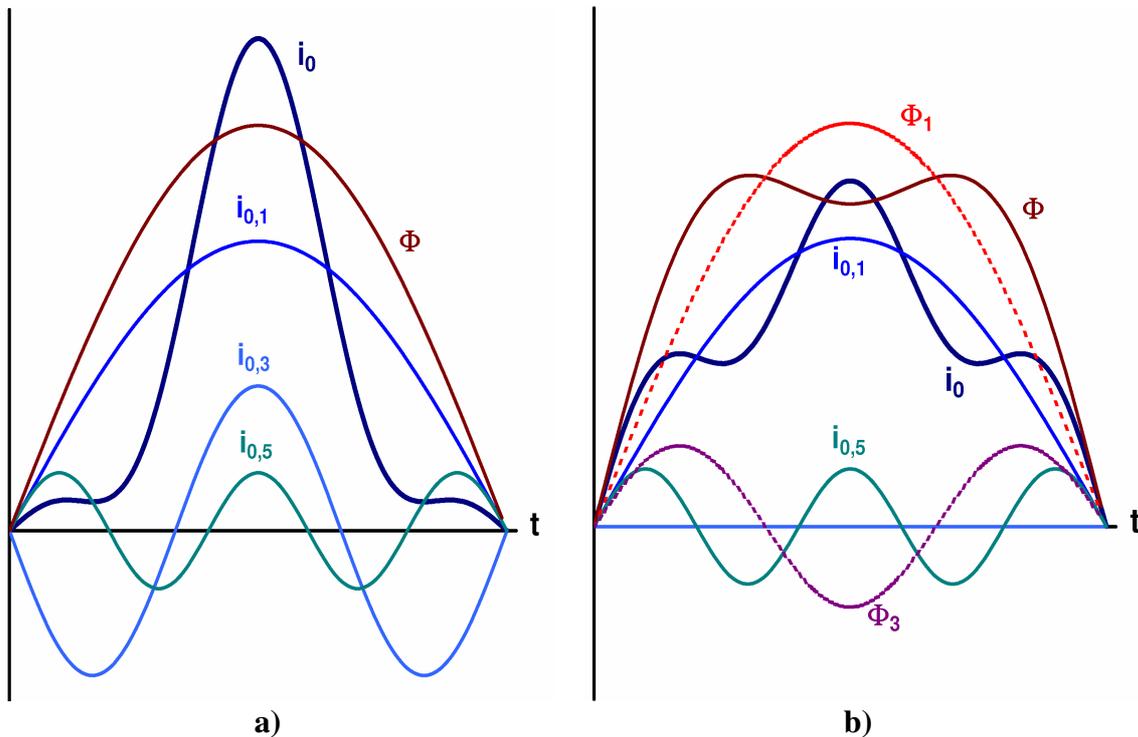


Fig. 1: Curvas de corriente de vacío i_0 y del flujo Φ .

- a) Con presencia del tercer armónico en la corriente i_0
b) Con ausencia del tercer armónico en la corriente i_0

La forma de esta corriente de vacío es tal que su descomposición en serie de Fourier da un tercer armónico de valor acusado (Fig. 1a). El conjunto de estas corrientes terceras armónicas para las tres fases del banco forma un sistema homopolar; es decir, están en fase:

$$i_{R,0,3} = \sqrt{2} I_{0,3} \cos(3\omega t)$$

$$i_{S,0,3} = \sqrt{2} I_{0,3} \cos\left[3\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right)\right] = \sqrt{2} I_{0,3} \cos(3\omega t)$$

$$i_{T,0,3} = \sqrt{2} I_{0,3} \cos\left[3\left(\omega t + \frac{2\pi}{3}\right)\right] = \sqrt{2} I_{0,3} \cos(3\omega t)$$

$$\bar{I}_{R,0,3} = \bar{I}_{S,0,3} = \bar{I}_{T,0,3} (= \bar{I}_{0,3})$$

Ahora bien, no es conveniente que por las líneas aéreas circulen armónicos de corriente de frecuencia $3 \times 50 = 150$ Hz, ya que se trata de una frecuencia audible y se pueden producir interferencias sobre líneas telefónicas cercanas.

Por esta razón, en las líneas de A.T. no se suele disponer de un conductor neutro y el neutro del primario del banco de transformadores está aislado. De esta manera no puede existir corriente de neutro y se obliga a que las tres intensidades de fase tengan siempre una suma nula. En el caso de los terceros armónicos de corriente, como forman un sistema homopolar, si su suma es nula se obliga a que también sean nulos los terceros armónicos de corriente de cada fase.

Por lo tanto, un banco de transformadores Yy con el primario sin hilo neutro consume en vacío unas corrientes sin terceros armónicos y, en consecuencia, prácticamente senoidales. Pero la curva de magnetización hace que si la intensidad es senoidal, el flujo no lo sea y tenga terceros armónicos (Fig. 2b). A su vez, las f.e.m.s inducidas por fase, e_1 en el primario y e_2 en el secundario; al ser de la misma forma que la derivada temporal del flujo ($\frac{d\Phi}{dt}$), tendrán también terceros armónicos. En vacío las tensiones de fase son prácticamente iguales a estas f.e.m.s de fase.

En resumen, la imposibilidad de que circulen corrientes homopolares por el primario del banco de transformadores hace que el flujo tenga terceros armónicos y el transformador actúe como generador de tensiones de fase homopolares de frecuencia 150 Hz, tanto en el primario como en el secundario. Estas tensiones pueden originar aumentos de tensión peligrosos en los devanados.

Sin embargo, las tensiones fase-fase carecen de terceros armónicos. Así, por ejemplo, en el secundario el 3º armónico de la tensión de vacío entre las fases R y S vale:

$$\bar{V}_{RS\ 20,3} = \bar{V}_{R\ 20,3} - \bar{V}_{S\ 20,3} = \bar{E}_{R\ 2,3} - \bar{E}_{S\ 2,3} = 0$$

ya que, al formar los terceros armónicos un sistema homopolar se tiene que:

$$\bar{E}_{R\ 2,3} = \bar{E}_{S\ 2,3}$$

Lo mismo sucede en transformadores trifásicos de 5 columnas donde el circuito magnético permite la circulación de flujos homopolares.

Transformador trifásico de 3 columnas con conexión Yy en vacío

En este caso, el tercer armónico del flujo, que es homopolar, no tiene ninguna columna del circuito magnético por donde cerrarse. Esto obliga a este flujo a circular a través del aire y de la cuba del transformador para cerrar su recorrido. Pero, entonces, sucede que el tercer armónico del flujo tiene un camino de gran reluctancia, lo que provoca que este flujo sea ahora mucho más reducido que en el caso del banco de tres transformadores trifásicos o del transformador trifásico de 5 columnas. De todo esto se deduce que ahora los terceros armónicos de f.e.m. de fase serán mucho más pequeños que en el caso anterior.

Sin embargo, como este flujo circulará por la cuba del transformador, que no está diseñada para ello, aparecerán unas pérdidas en el hierro adicionales en ella.

Transformación Dy en vacío

En este caso pueden circular corrientes homopolares de fase por el primario que se cierran dentro del triángulo. En consecuencia, los flujos y las f.e.m.s son perfectamente senoidales, tanto cuando la transformación se realice mediante un banco de tres transformadores trifásicos como cuando se utilicen transformadores trifásicos de tres o cinco columnas.

Aunque las corrientes de fase tengan terceros armónicos, las de línea carecen de ellos (Fig. 2). Así, en la fase R el tercer armónico de la corriente vale

$$\bar{I}_{R\ 0,3} = \bar{I}_{RS\ 0,3} - \bar{I}_{TR\ 0,3} = 0$$

ya que al tratarse de un sistema homopolar sucede que:

$$\bar{I}_{RS\ 0,3} = \bar{I}_{ST\ 0,3} = \bar{I}_{TR\ 0,3} (= \bar{I}_{0,3})$$

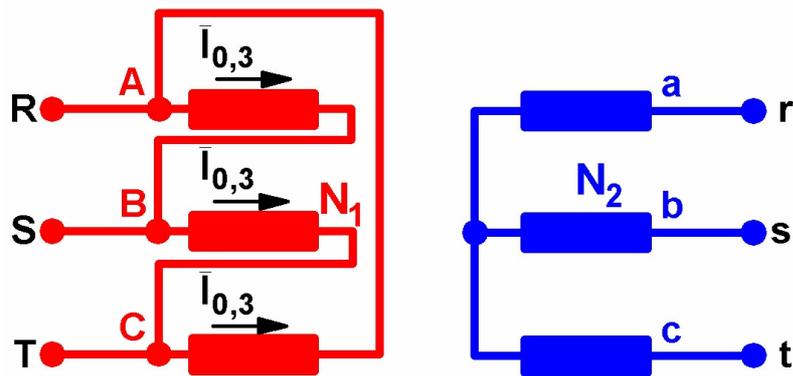


Fig. 2: Transformación Dy en vacío

Transformación Yd en vacío

Si el primario tiene su neutro aislado no habrá terceros armónicos de corriente, por lo que, en principio, aparecerán terceros armónicos de flujo que originan terceros armónicos de f.e.m. en las fases del secundario.

Pero, entonces, en vacío estas f.e.m.s provocan una circulación de terceros armónicos de corriente de fase que se cierran dentro del triángulo (no habrá, en consecuencia, terceros armónicos en las corrientes de línea), los cuáles generan terceros armónicos de flujo que prácticamente anulan a los terceros armónicos del flujo inicial.

Por esta razón, tanto en los bancos de tres transformadores monofásicos como en los transformadores trifásicos de 3 ó 5 columnas con la conexión Yd, en vacío apenas aparecen terceros armónicos del flujo y de las f.e.m.s y sólo surgen unas corrientes homopolares (de tercer armónico) de fase en el secundario que no afectan a las corrientes de línea (Fig. 3).

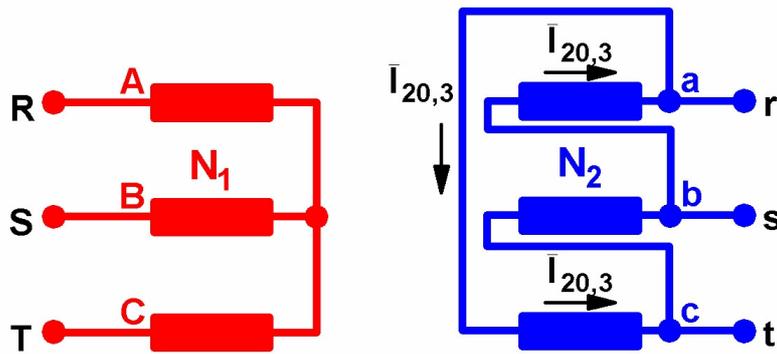


Fig. 3: Transformación Yd en vacío

Transformación Yy con devanado terciario en triángulo en vacío

En este caso, al igual que en el yD, los terceros armónicos de corriente de fase que aparecen en el triángulo terciario prácticamente eliminan los terceros armónicos de flujo y se obtienen f.e.m.s de fase senoidales (Fig. 4).

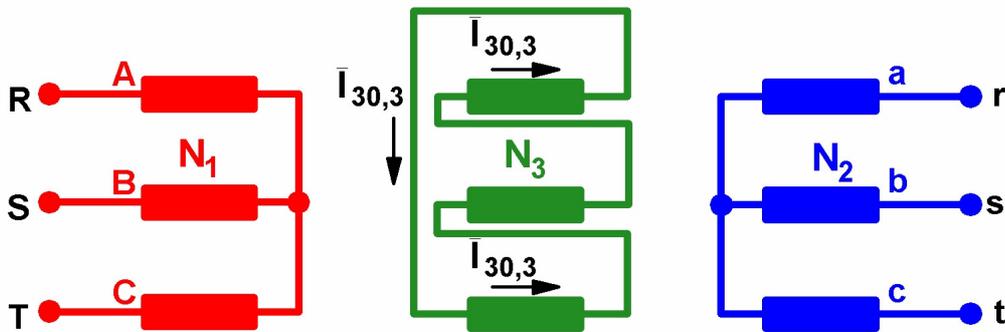
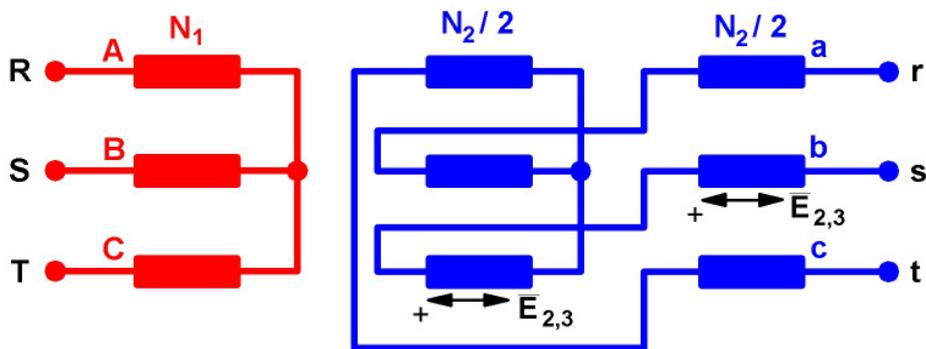


Fig. 4: Transformación Yy con devanado terciario en vacío

Transformación Yz en vacío



(Las f.e.m.s $E_{2,3}$ de los semidevanados se anulan entre sí)

Fig. 5: Transformación Yz en vacío

Al igual que en las transformaciones Yy, si el primario carece de neutro, la corriente de vacío carece de tercer armónico y el flujo lo posee. Este tercer armónico de flujo induce terceros armónicos de f.e.m. en los semidevanados del zig-zag. Como cada fase del zig-zag consta de dos semidevanados conectados en oposición, las f.e.m.s homopolares (terceros armónicos) inducidas en cada uno se restan y se anulan. En consecuencia, las f.e.m.s totales de fase del secundario carecen de tercer armónico (Fig. 5).