



**UNIVERSIDAD DE CANTABRIA**  
**DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA**  
**ELÉCTRICA Y ENERGÉTICA**



# **TRANSFORMADORES TRIFÁSICOS** **CON CARGAS MONOFÁSICAS**

**Miguel Angel Rodríguez Pozueta**

**Doctor Ingeniero Industrial**

© 2016, Miguel Angel Rodríguez Pozueta

Universidad de Cantabria (España)

Departamento de Ingeniería Eléctrica y Energética

*This work is licensed under the Creative Commons Attribution-NonCommercial-ShareAlike 4.0 International License. To view a copy of this license, visit*

*<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/> or send a letter to Creative Commons, PO Box 1866, Mountain View, CA 94042, USA.*



*Está permitida la reproducción total o parcial de este documento bajo la licencia Creative Commons Reconocimiento-NoComercial-CompartirIgual 4.0 Unported que incluye, entre otras, la condición inexcusable de citar su autoría (Miguel Angel Rodríguez Pozueta - Universidad de Cantabria) y su carácter gratuito.*

*Puede encontrar más documentación gratuita en la página web del autor:*

*<http://personales.unican.es/rodrigma/primer/publicaciones.htm>*

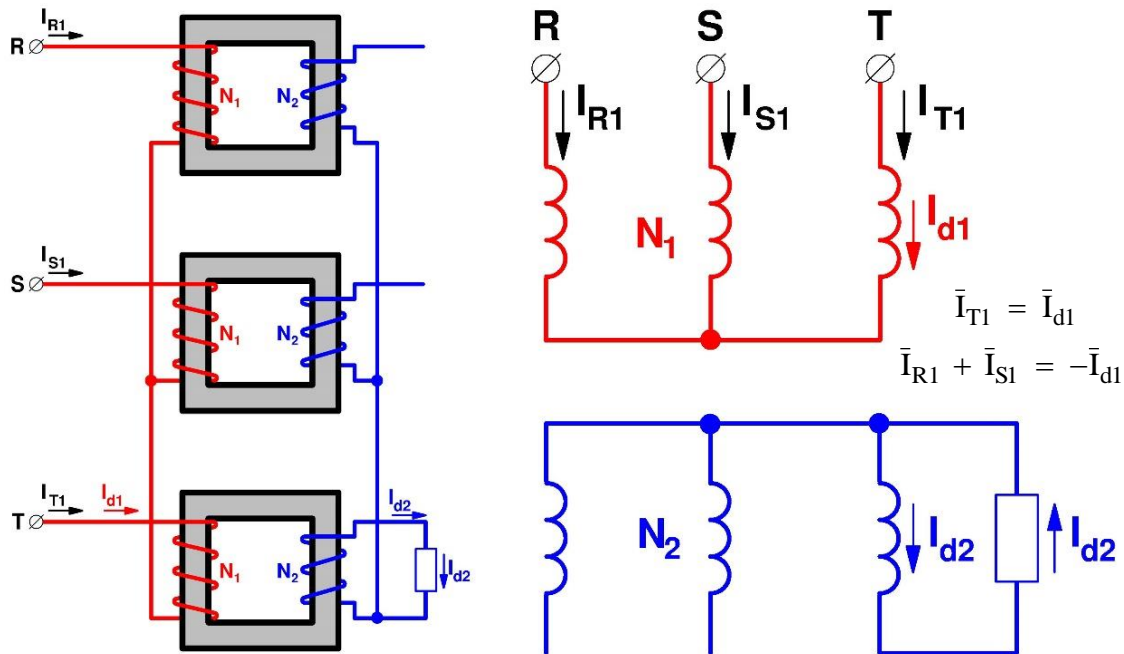
## TRANSFORMADORES TRIFÁSICOS CON CARGAS MONOFÁSICAS

Miguel Angel Rodríguez Pozueta

### Conexión estrella-estrella con carga monofásica entre fase y neutro

#### Banco de 3 transformadores monofásicos o transformador trifásico de 5 columnas

Consideremos un banco de tres transformadores monofásicos conectados en estrella-estrella, con el neutro primario aislado y que en su secundario tenga conectada una carga monofásica entre la fase T y el neutro, como se muestra en la Fig. 1 (en esta figura y en las siguientes se va a suponer que el primario es el lado de alta tensión).



*Fig. 1: Banco de tres transformadores monofásicos Yy con una carga monofásica fase-neutro*

Como el neutro del primario está aislado se cumple que

$$\bar{I}_{R1} + \bar{I}_{S1} + \bar{I}_{T1} = 0$$

La carga monofásica da lugar a la circulación de una corriente  $I_{d2}$  por el secundario del transformador conectado en la fase T. Esta corriente  $I_{d2}$  obliga a que por el primario de este transformador circule la corriente  $I_{d1}$ . Así se consigue que el flujo en esta fase,  $\Phi_T$ , no aumente excesivamente, puesto que se verifica lo siguiente

$$N_1 \bar{I}_{d1} - N_2 \bar{I}_{d2} = \mathcal{R} \bar{\Phi}_T \approx 0 \rightarrow \bar{I}_{d1} \approx \bar{I}_{d2} / m$$

Como el neutro de la estrella del primario no está conectado a la red, esta corriente  $I_{d1}$  se cierra a través de las otras fases, de tal manera que

$$\bar{I}_{R1} + \bar{I}_{S1} + \bar{I}_{T1} = 0 \rightarrow \bar{I}_{R1} + \bar{I}_{S1} = -\bar{I}_{T1} = -\bar{I}_{d1}$$

Ahora bien, si el transformador de la fase R funcionara con una marcha industrial sucedería que

$$N_1 \bar{I}_{R1} - N_2 \bar{I}_{R2} = N_1 \bar{I}_{R0} = \mathcal{R} \bar{\Phi}_R$$

Pero al conectar una carga monofásica entre la fase T y el neutro sucede que

$$\bar{I}_{R1} \gg \bar{I}_{R0} ; \quad \bar{I}_{R2} = 0$$

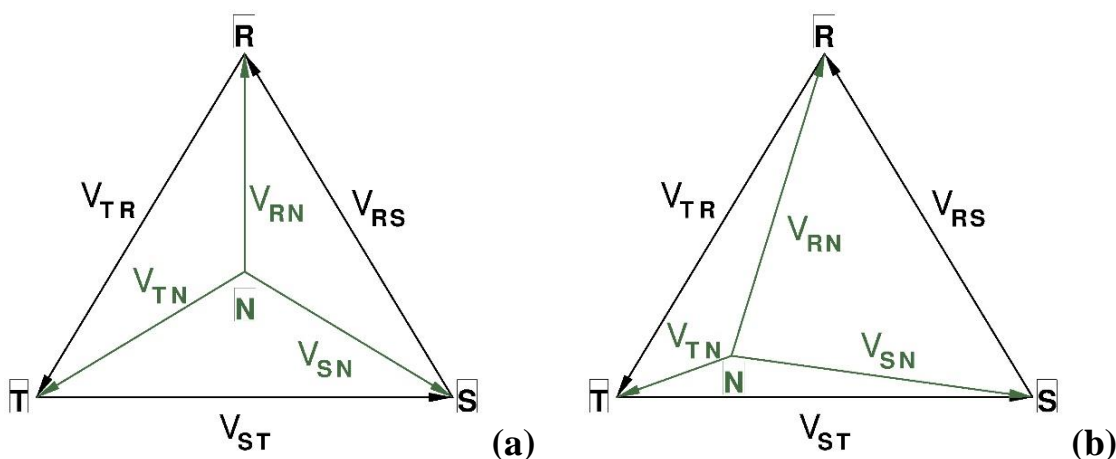
Así pues, ocurre que por el primario de la fase R circula una corriente que puede ser mucho más grande que su corriente de vacío, mientras que su corriente secundaria es nula. En consecuencia, el flujo en esta fase ahora es mayor que en marcha industrial:

$$\bar{\Phi}'_R = \frac{N_1 \bar{I}_{R1}}{\mathcal{R}'} \gg \frac{N_1 \bar{I}_{R0}}{\mathcal{R}} = \bar{\Phi}_R \quad \rightarrow \quad \bar{\Phi}'_R \gg \bar{\Phi}_R$$

Al ser el flujo del transformador monofásico de la fase R del banco mucho mayor que su flujo en marcha industrial (es decir, mayor que el flujo asignado), en los devanados de este transformador aparecerán unas fuerzas electromotrices (f.e.m.s) inducidas muy grandes. Esto origina unas sobretensiones en los devanados de la fase R que pueden dañar sus aislamientos. Lo mismo sucede en el transformador de la fase S.

En resumen, con este tipo de cargas dos de los tres transformadores monofásicos del banco están en vacío (su corriente secundaria es nula), pero en cada uno de ellos la corriente primaria es mucho mayor que la corriente de vacío en marcha industrial (es decir, con tensión y frecuencia primarias asignadas). En consecuencia, en estos transformadores el flujo magnético es mucho mayor que en condiciones asignadas, lo que hace que las f.e.m.s inducidas en sus devanados también tengan valores superiores a los asignados.

De lo anterior se deduce que las f.e.m.s de fase del banco están desequilibradas, tanto en el primario como en el secundario. En efecto, las f.e.m.s primaria y secundaria de la fase cargada (la fase T en la Fig. 1) disminuyen con respecto al funcionamiento con cargas equilibradas y las f.e.m.s de las otras dos fases (las fases R y S en la Fig. 1) aumentan y producen unas tensiones elevadas en estas fases (las cuales se tratan de tensiones fase-neutro debido a la conexión estrella del primario y del secundario). Sin embargo, no aumenta el valor de ninguna de las tensiones compuestas (entre fases) que siguen estando equilibradas porque las tensiones entre fases del primario están fijadas por la red a la que están conectadas.



*Fig. 2: Sistemas de tensiones fase-fase y fase-neutro en el primario o en el secundario de un banco de tres transformadores monofásicos estrella-estrella:*

- a) equilibradas*
- b) desequilibradas debido a la conexión de una carga monofásica en el secundario entre las fase T y el neutro*

En la Fig. 2 se muestran las tensiones compuestas (esto es, las tensiones fase-fase) y las tensiones fase-neutro, bien del primario o bien del secundario, del banco de tres transformadores monofásicos, cuando están equilibradas (Fig. 2a) y cuando se desequilibran debido a la carga monofásica fase T-neutro (Fig. 2b). Se aprecia que este tipo de desequilibrio desplaza al punto neutro de su posición central, pero los lados del triángulo (las tensiones compuestas) quedan igual que en el caso equilibrado.

Este funcionamiento es incorrecto: un banco de tres transformadores monofásicos con conexión estrella-estrella y el neutro primario aislado no debe tener cargas desequilibradas fase-neutro.

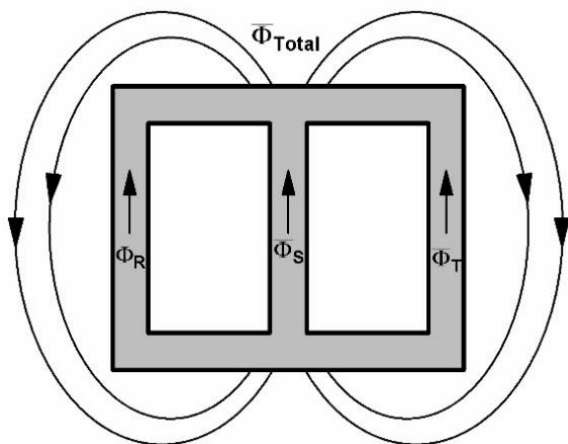
Si en lugar de un banco de tres transformadores monofásicos, se trata de un *transformador trifásico de cinco columnas* se producen los mismos fenómenos. Esto se debe a que en ambos casos los flujos desequilibrados pueden circular fácilmente porque todo su recorrido se realiza por el núcleo magnético del equipo, el cual presenta pequeña reluctancia por estar fabricado con material ferromagnético (ver el siguiente apartado).

### Transformador trifásico de tres columnas

Si se trata de un transformador trifásico de tres columnas conectado en estrella-estrella, el fenómeno es algo diferente. En efecto, las corrientes representadas en la Fig. 1 dan lugar a tres flujos no equilibrados cuya suma no es nula. Es decir,

$$\bar{\Phi}_R + \bar{\Phi}_S + \bar{\Phi}_T = \bar{\Phi}_{Total} \neq 0$$

En el banco de tres transformadores monofásicos, los flujos  $\Phi_R$ ,  $\Phi_S$  y  $\Phi_T$  circulan por circuitos magnéticos independientes. En el transformador trifásico de cinco columnas, las columnas laterales permiten una fácil circulación del flujo total  $\Phi_{Total}$ .



*Fig. 3: Flujos desequilibrados cuya suma no es nula en un transformador de tres columnas*

Sin embargo, en un transformador de tres columnas no hay ninguna parte del núcleo magnético de la máquina que permita que el flujo  $\Phi_{Total}$  circule fácilmente. Por lo tanto, este flujo tiene que circular a través del aire y de la cuba del transformador, es decir, a través de un circuito de alta reluctancia (Fig. 3). Luego, ahora se tiene que:

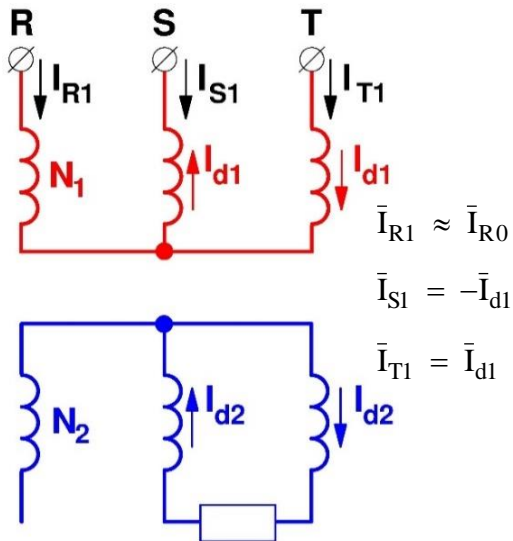
$$\bar{\Phi}'_R = \frac{N_1 \bar{I}_{R1}}{\mathcal{R}'} \quad \text{con } \mathcal{R}' \gg \mathcal{R}$$

Por lo tanto, en este caso se tiene un flujo  $\Phi'_R$  que no es tan grande como en el banco de tres transformadores monofásicos y las sobretensiones son menores.

Se permiten cargas fase-neutro en los transformadores Yy de tres columnas, siempre que no originen corrientes superiores al 10% de la asignada.

Estos problemas se resolverían conectando el neutro del primario al de la red. Sin embargo, esto no se suele hacer para que no exista la posibilidad de circulación de terceros armónicos de corriente por el primario y así evitar la producción de interferencias sobre líneas telefónicas próximas (ver los apuntes sobre los armónicos en las corrientes de vacío).

**Conexión estrella-estrella con carga monofásica fase-fase**



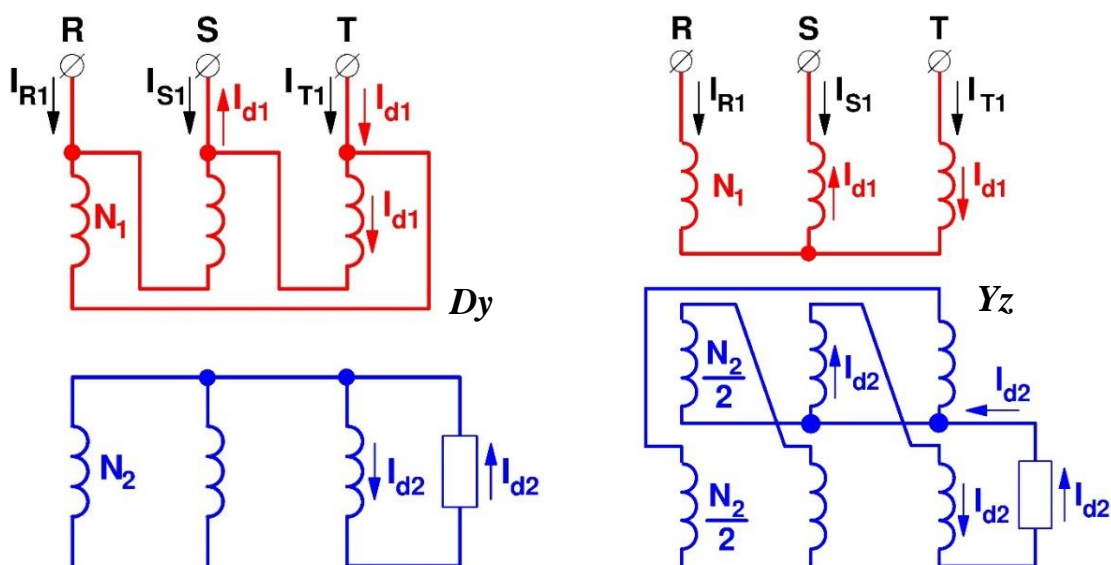
Si un banco de tres transformadores monofásicos o un transformador trifásico de tres o cinco columnas con la conexión estrella-estrella y con el neutro primario aislado tiene una carga monofásica conectada entre dos fases, no aparecen sobretensiones. Por lo tanto, en estos transformadores se admite este tipo de cargas.

En efecto, como se aprecia en la Fig. 4, en este caso no existe ninguna fase con una corriente en el primario que no esté contrarrestada por otra corriente en el secundario.

*Fig. 4: Transformador Yy con carga monofásica entre fases*

**Otras conexiones (Yd, Dy, Dd, Yz)**

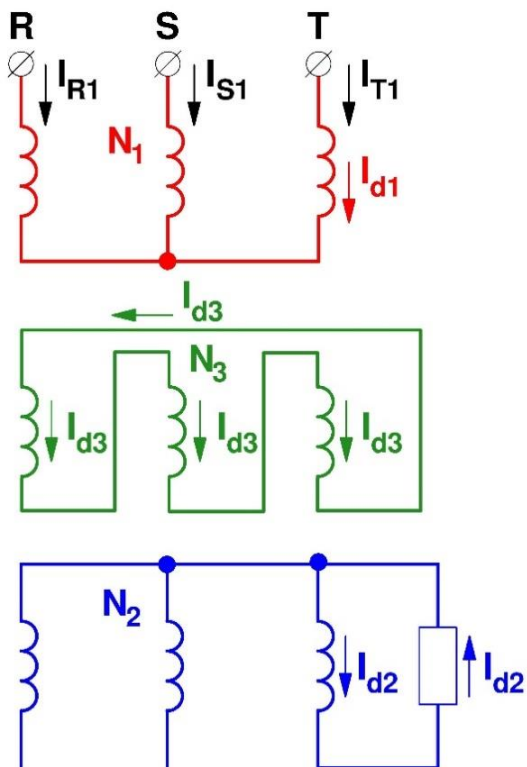
Aparte de la conexión estrella-estrella con el neutro primario aislado, todas las demás admiten sin problemas la existencia de cargas desequilibradas fase-neutro o fase-fase.



*Figs. 5 y 6: Conexiones Dy e Yz con cargas monofásicas fase-neutro*

Así, en las figuras 5 y 6 se puede apreciar que en las conexiones triángulo-estrella y estrella-triángulo con carga fase-neutro no existen fases con una corriente superior a la de vacío en el primario que no esté contrarrestada por otra en el secundario. Por lo tanto, con estas conexiones no aparecen sobretensiones, cualquiera que sea el tipo de transformador utilizado.

**Arrollamientos terciarios o de compensación**



*Fig. 7: Transformador Yy con devanado terciario o de compensación*

Colocando un tercer arrollamiento en cada fase de un transformador estrella-estrella con el neutro primario aislado y conectando estos arrollamientos en triángulo desaparecen los inconvenientes debidos a las cargas desequilibradas entre fase y neutro (Fig. 7). Estos arrollamientos se denominan terciarios o de compensación.

En la Fig. 7 se verifica que

$$\begin{cases} \bar{I}_{R1} + \bar{I}_{S1} = -\bar{I}_{T1} = -\bar{I}_{d1} \\ \bar{I}_{R1} N_1 - \bar{I}_{d3} N_3 = \mathcal{R} \bar{\Phi}_R \\ \bar{I}_{S1} N_1 - \bar{I}_{d3} N_3 = \mathcal{R} \bar{\Phi}_S \\ \bar{I}_{T1} N_1 - \bar{I}_{d2} N_2 - \bar{I}_{d3} N_3 = \mathcal{R} \bar{\Phi}_T \end{cases}$$

Para cualquier corriente monofásica Id2 en el secundario aparecerán corrientes en los otros devanados que cumplen el sistema anterior.

Por lo tanto, en ninguna fase sucede que hay en un devanado una corriente mayor que la de vacío que no esté compensada por la corriente de, al menos, otro devanado. En consecuencia, el flujo es similar al asignado en todas las fases y no aparecen sobretensiones.

**BIBLIOGRAFÍA**

- [1] FRAILE MORA, J. 2015. *Máquinas eléctricas*. Madrid: Ibergarceta Publicaciones, S.L.
- [2] GURRUTXAGA, J. A. 1985. *El fenómeno electromagnético. Tomo IV. Las máquinas eléctricas II*. Santander: Dpto. de publicaciones de la E.T.S.I.C.C.P. de Santander.
- [3] IVANOV-SMOLENSKI. 1984. *Máquinas eléctricas. Tomo 2*. Moscú: Editorial Mir.
- [4] KOSTENKO y PIOTROVSKI. 1979. *Máquinas eléctricas. Tomo II*. Moscú: Editorial Mir.
- [5] RAS OLIVA. 1998. *Transformadores de potencia, de medida y de protección*. Barcelona: Marcombo.