



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



# **TRANSFORMADORES**

# **TRIFÁSICOS CON CARGAS**

# **DESEQUILIBRADAS**

**Miguel Angel Rodríguez Pozueta**

**Doctor Ingeniero Industrial**

© 2018, 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 DESEQUILIBRADAS**

**Miguel Angel Rodríguez Pozueta**

### **Impedancias directa, inversa y homopolar en transformadores**

Un sistema trifásico de tensiones o de intensidades *sinusoidales* de igual frecuencia es equilibrado si las tensiones o intensidades de las tres fases tienen el mismo valor eficaz y el desfase temporal entre dos de ellas es de  $120^\circ$ . Si no se cumple alguna de estas dos condiciones el sistema es desequilibrado. Las tres tensiones o intensidades de un sistema equilibrado sinusoidal suman siempre cero. El estudio de redes trifásicas desequilibradas con corrientes y tensiones sinusoidales se realiza mediante el método de las componentes simétricas.

El método de las componentes simétricas indica que un sistema trifásico de tensiones o de intensidades sinusoidales desequilibrado es equivalente a la suma de tres sistemas:

- Un sistema trifásico sinusoidal equilibrado de secuencia directa o positiva que tiene la misma secuencia de fases que el sistema trifásico desequilibrado de partida.
- Un sistema trifásico sinusoidal equilibrado de secuencia inversa o negativa cuya secuencia de fases es opuesta a la del sistema desequilibrado de partida.
- Un sistema trifásico sinusoidal homopolar o de secuencia cero. En él las tres tensiones o las tres intensidades están en fase y, por lo tanto, estas tres tensiones o intensidades son iguales, tanto en módulo como en argumento.

Es fácil comprobar, entonces, que la suma de las tres tensiones o intensidades del sistema homopolar no es igual a cero. En consecuencia, si las tres tensiones o intensidades del sistema sinusoidal desequilibrado original suman cero, su correspondiente sistema homopolar es nulo (carecen de sistema homopolar).

En un triángulo la suma de las tres corrientes de línea es nula y, por lo tanto, en esta conexión las corrientes de línea carecen de componente homopolar. Es sabido que la corriente en el neutro de una estrella es igual a la suma de las tres corrientes de fase, las cuáles son en este caso también corrientes de línea. En consecuencia, si una estrella tiene el neutro aislado su corriente de neutro es nula, por lo que sus tres corrientes de fase deben sumar cero y estas corrientes tendrán una componente homopolar nula. Sólo cuando la estrella tiene su neutro conectado al de la red es posible que haya corriente de neutro y que, consecuentemente, sus corrientes de fase (que también son de línea) tengan una componente homopolar no nula.

En resumen, la existencia de una componente homopolar de las corrientes de línea no nula exige que haya una corriente de neutro no nula.

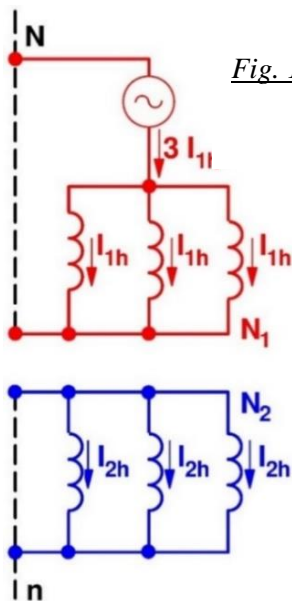
Una transformación trifásica de tensiones se puede realizar por medio de un banco de tres transformadores monofásicos o mediante un transformador trifásico de tres o de cinco columnas. En la práctica se puede aceptar que estos equipos están equilibrados internamente; es decir, presentan la misma impedancia para cada una de sus fases. Por lo tanto, si uno de estos equipos se alimenta con un sistema trifásico de tensiones de secuencia directa, solamente se obtienen corrientes que forman un sistema de secuencia directa. Análogamente, un sistema de tensiones de secuencia inversa sólo origina corrientes de secuencia inversa y un sistema de tensiones homopolar sólo da lugar a corrientes homopolares. Esto es, en estos equipos no hay efectos cruzados entre las componentes simétricas de tensiones y de intensidades (todas ellas de igual frecuencia) y cada una de ellas se puede estudiar por separado empleando las impedancias correspondientes.

La impedancia por fase que presenta un transformador trifásico o un banco de tres transformadores monofásicos para los sistemas de secuencia directa e inversa es la misma (la que presenta frente a cargas equilibradas). Por lo tanto, el estudio del transformador o del banco para estos sistemas de secuencia se puede realizar utilizando el circuito equivalente que ya se conoce. Muchas veces este circuito equivalente se podrá reducir a la impedancia de cortocircuito  $Z_{cc}$ .

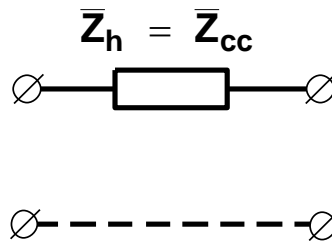
La impedancia homopolar  $Z_h$  de un transformador trifásico o de un banco de tres transformadores monofásicos depende de sus conexiones y de la forma del núcleo magnético. Para obtenerla experimentalmente se realiza un ensayo de cortocircuito homopolar. En este ensayo se alimenta con la misma tensión a las tres fases del primario (sistema de tensiones homopolar) y se cortocircuita el secundario y, además, este cortocircuito se une al neutro de la red.

En los siguientes apartados se va a indicar cómo es la impedancia homopolar  $Z_h$  para algunos tipos de transformaciones trifásicas. Para ello se va a mostrar su circuito equivalente para la secuencia homopolar. Estos circuitos equivalentes se refieren a una fase y el neutro (el cual se representa por medio de una línea de trazos). Esto es así porque las corrientes homopolares de línea, de existir, se cierran por el neutro.

**Banco de tres transformadores monofásico estrella-estrella con ambos neutros unidos a la red**



*Fig. 1: Ensayo de cortocircuito homopolar en un banco con conexión YNyn*



*Fig. 2: Circuito equivalente homopolar de un banco YNyn*

En este caso el ensayo de cortocircuito homopolar está representado en la Fig. 1. En esta figura y en las siguientes se va a suponer que el primario es el lado de alta tensión.

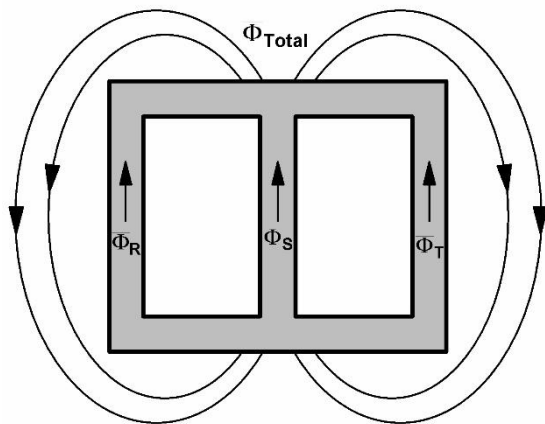
Al tratarse de transformadores monofásicos los flujos homopolares pueden circular sin problemas por el núcleo magnético de cada transformador. Además, al estar ambos neutros unidos a la red puede haber corrientes homopolares tanto en el primario como en el secundario.

Por lo tanto, cada transformador del banco queda conectado en cortocircuito y, en consecuencia, presentará una impedancia igual a la de cortocircuito  $Z_{cc}$ . El circuito equivalente homopolar para este banco será, pues, el representado en la Fig. 2.

El transformador trifásico de cinco columnas se comporta de igual manera que el banco de tres transformadores monofásicos y su circuito equivalente homopolar para esta conexión también será el representado en la Fig. 2. Esto se debe a que en ambos casos los flujos homopolares 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.

**Transformador trifásico de 3 columnas estrella-estrella con ambos neutros unidos a la red**

Al igual que en el caso anterior en este transformador pueden existir corrientes homopolares en el primario y en el secundario. Sin embargo, en un transformador de tres columnas el núcleo magnético está diseñado para conducir flujos cuya suma sea nula; luego los flujos homopolares que estas corrientes generan se ven forzados a cerrarse por el aire y por la cuba del transformador, los cuales presentan una reluctancia elevada (Fig. 3).



*Fig. 3: Si la suma de los tres flujos de fase en un transformador trifásico de tres columnas no es nula (lo que equivale a que los flujos tienen una componente homopolar no nula), el flujo total resultante (que es proporcional al flujo homopolar) se debe cerrar por fuera del núcleo magnético y se encuentra con un camino de gran reluctancia.*

Esto hace que para obtener los mismos flujos homopolares (y, por tanto, los mismos enlaces de flujo homopolares  $\Psi_h$ ) se requieran corrientes homopolares  $I_h$  más elevadas que en el caso anterior. De esto se deduce que:

$$L_h = \frac{\Psi_h}{I_h} \ll L_{cc} \rightarrow X_h \ll X_{cc} \rightarrow \boxed{Z_h \ll Z_{cc}}$$

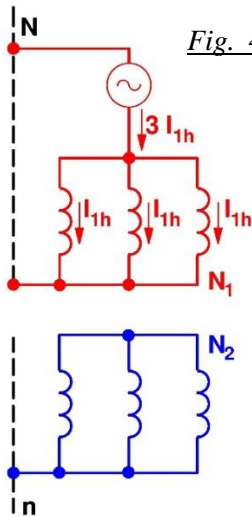
Es decir, para este transformador el circuito equivalente homopolar es similar al dibujado en la Fig. 2, pero con un menor valor de la impedancia  $Z_h$ .

**Banco de tres transformadores monofásico estrella-estrella con sólo el neutro primario unido a la red (o sólo el neutro secundario)**

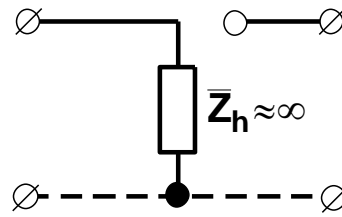
En este caso el ensayo de cortocircuito homopolar es el representado en la Fig. 4. En ella se aprecia que ahora por el secundario no pueden circular corrientes homopolares, pues al estar el neutro aislado no tienen un camino por donde cerrar su recorrido.

Luego, cada uno de los transformadores monofásicos del banco tiene su secundario sin corriente, es decir, está en vacío. Por lo tanto, la impedancia homopolar que presenta este banco corresponde a la rama en paralelo del circuito equivalente de cada transformador. Es decir, una impedancia muy elevada, casi infinita.

Se deduce, pues, que el circuito equivalente homopolar para este banco es el representado en la Fig. 5, el cual también es válido para transformadores trifásicos de 5 columnas.



*Fig. 4: Ensayo de cortocircuito homopolar en un banco con conexión YNy*

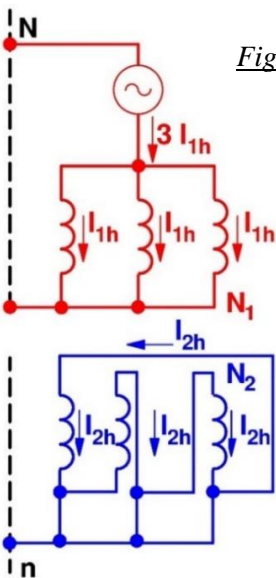


*Fig. 5: Circuito equivalente homopolar de un banco YNy*

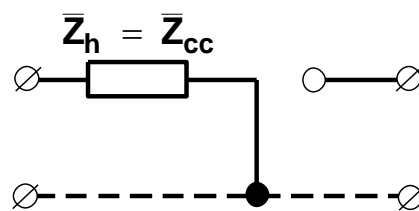
**Transformador trifásico de tres columnas estrella-estrella con sólo el neutro primario conectado a la red**

Este caso es similar al anterior, pero con la diferencia de que los flujos homopolares no se cierran por el núcleo magnético, sino por la cuba y el aire (Fig. 3). Por lo tanto, en el ensayo de cortocircuito homopolar para generar los mismos flujos se necesitará ahora que circulen unas corrientes mayores que para el banco de tres transformadores monofásicos. Luego, el circuito equivalente homopolar de este transformador será como el de la Fig. 5, pero con una impedancia  $Z_h$  menor (suele tomar un valor entre el 20 y el 100% de  $V_{1N}/I_{1N}$ ).

**Banco de tres transformadores monofásico estrella-triángulo con el neutro a la red**



*Fig. 6: Ensayo de cortocircuito homopolar en un banco con conexión YNd*



*Fig. 7: Circuito equivalente homopolar de un banco YNd*

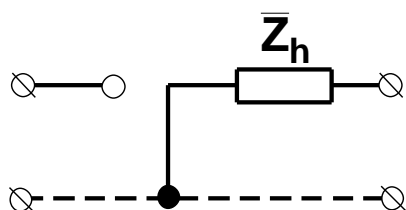
En este caso el ensayo de cortocircuito homopolar es el representado en la Fig. 6. La conexión triángulo hace que en este ensayo las tres f.e.m.s inducidas en el secundario estén en serie y el conjunto de todas ellas en cortocircuito. Esto equivale a que cada transformador del banco estuviera en cortocircuito. Además, se aprecia que la intensidad homopolar del secundario sólo circula por las fases (dentro del triángulo), pero no por la línea. En consecuencia, el circuito equivalente homopolar de este banco es el representado en la Fig. 7, el cual también es válido para transformadores trifásicos de cinco columnas.

### **Transformador trifásico de tres columnas estrella-triángulo con el neutro a la red**

El circuito equivalente homopolar de este transformador será como el de la Fig. 7, pero con una impedancia  $Z_h$  menor debido a que los flujos homopolares no se pueden cerrar por el núcleo magnético y deben hacerlo a través de un camino de alta reluctancia, como el aire y la cuba del transformador (Fig. 3).

### **Transformación triángulo-estrella con el neutro unido a la red**

Para obtener el circuito equivalente homopolar basta con invertir el correspondiente a la conexión estrella-triángulo con el neutro unido a la red (ver la Fig. 7 y los apartados anteriores). Se obtiene, pues el circuito equivalente de la Fig. 8.

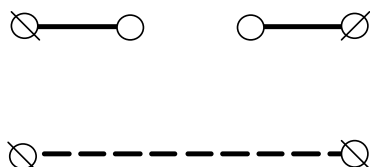


*Fig. 8: Circuito equivalente homopolar de un banco Dyn*

### **Transformaciones estrella-triángulo y triángulo-estrella con el neutro aislado**

En estos casos no pueden circular corrientes homopolares ni por el primario ni por el secundario. La impedancia homopolar es, pues, infinita; tanto para el banco de transformadores monofásicos como para los transformadores trifásicos de tres y de cinco columnas.

En consecuencia, para estas conexiones el circuito equivalente homopolar es el representado en la Fig. 9.



*Fig. 9: Circuito equivalente homopolar para las conexiones Yd y Dy*

### **Otras conexiones**

Razonando de manera análoga a como se ha hecho en los casos anteriores se pueden deducir los circuitos equivalentes homopolares de todas las posibles conexiones para una transformación de tensiones trifásica.

### **BIBLIOGRAFÍA**

- [1] FRAILE MORA, J. 2015. *Máquinas eléctricas*. Madrid: Ibergarceta Publicaciones, S.L.
- [2] GRAINGER, J. J. y STEVENSON, W. D. 1996. *Análisis de Sistemas de Potencia*. Méjico: McGraw-Hill/Interamericana de México, S.A.
- [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.