

## TRANSFORMADORES TRIFÁSICOS CON CARGAS DESEQUILIBRADAS

Miguel Ángel Rodríguez Pozueta

### Impedancias directa, inversa y homopolar en transformadores

El estudio de redes trifásicas desequilibradas se realiza mediante el método de las componentes simétricas.

Un sistema trifásico de tensiones o de intensidades 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 condiciones el sistema es desequilibrado. Las tres tensiones o intensidades de un sistema equilibrado suman siempre cero.

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

- Un sistema equilibrado de secuencia directa o positiva que tiene la misma secuencia de fases que el sistema trifásico desequilibrado de partida.
- Un sistema equilibrado de secuencia inversa o negativa cuya secuencia de fases es opuesta a la del sistema desequilibrado de partida.
- Un sistema desequilibrado homopolar o de secuencia cero. En él las tensiones o las intensidades de las tres fases 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 desequilibrado original suman cero, su correspondiente sistema homopolar es nulo (carecen de sistema homopolar).

La impedancia que presenta un transformador trifásico 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 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  $Z_h$  del transformador depende de sus conexiones y de la forma del circuito 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 indicar cómo es la impedancia homopolar  $Z_h$  para algunos tipos de transformadores. Para ello se va a mostrar el circuito equivalente del transformador 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 existir, se cierran por el neutro.

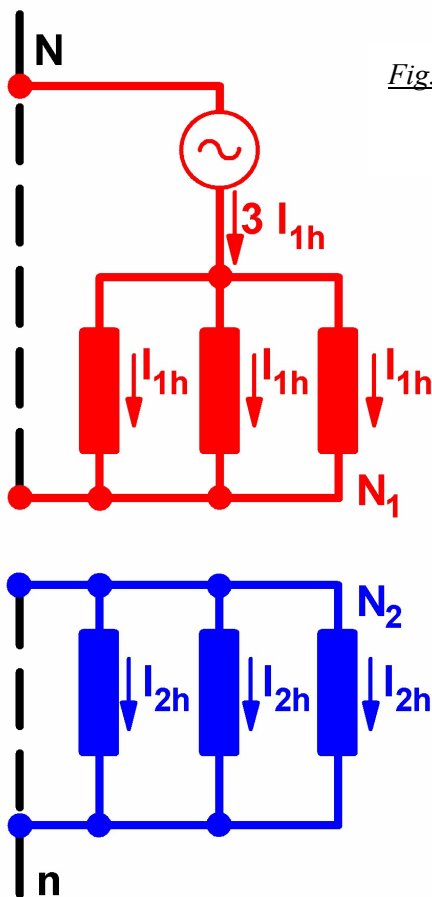
**Banco de tres transformadores monofásico Yy con ambos neutros unidos a la red**

El ensayo de cortocircuito homopolar de este banco está representado en la Fig. 1.

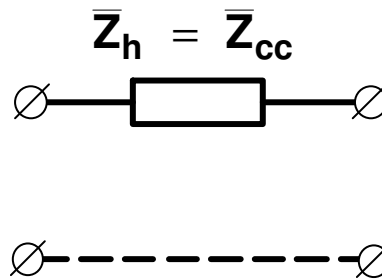
Al tratarse de transformadores monofásicos los flujos homopolares pueden circular sin problemas por el circuito magnético de cada transformador. Además, al estar ambos neutros unidos a la red puede haber corrientes homopolares tanto en el primario como en el secundario.

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 5 columnas con la conexión YNyn se comporta de igual manera que el banco y su circuito equivalente homopolar también será el representado en la Fig. 2.



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



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

**Transformador trifásico de 3 columnas Yy 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 3 columnas los flujos homopolares que estas corrientes generan se tienen que cerrar por el aire y por la cuba del transformador, los cuáles presentan una reluctancia elevada.

Esto hace que los flujos homopolares tengan un valor menor que en el caso anterior. De esto se deduce que:

$$L_h \ll L_{cc} \rightarrow X_h \ll X_{cc} \rightarrow \boxed{Z_h \ll Z_{cc}}$$

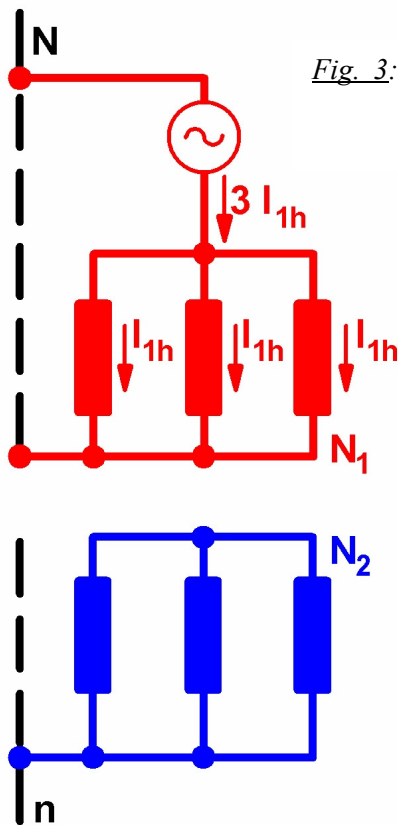
Es decir, para este transformador el circuito equivalente homopolar es similar al dibujado en la Fig. 2, pero con un menor valor de la impedancia  $Z_h$ .

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

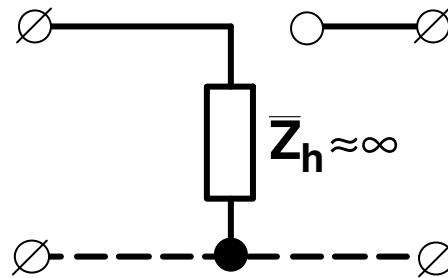
En este caso el ensayo de cortocircuito homopolar es el representado en la Fig. 3.

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.



*Fig. 3: Ensayo de cortocircuito homopolar en un banco con conexión YNy*



*Fig. 4: Circuito equivalente homopolar de un banco YNy*

Se deduce, pues, que el circuito equivalente homopolar para este banco es el representado en la Fig. 4, el cuál también es válido para transformadores trifásicos de 5 columnas.

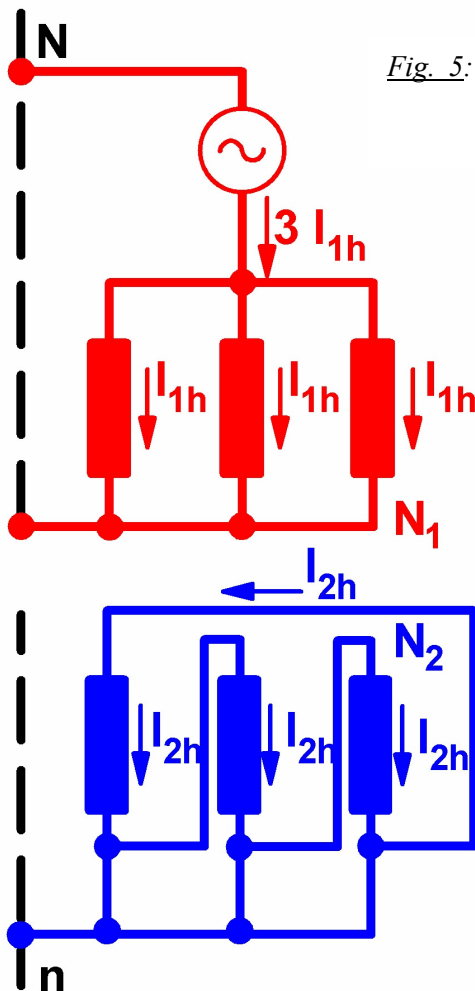
**Transformador trifásico de 3 columnas Yy con sólo el neutro primario conectado a la red**

Este caso es similar al anterior, pero con la diferencia de que el flujo homopolar no se cierra por el circuito magnético, sino por la cuba y el aire. Luego, en el ensayo de cortocircuito homopolar para generar el mismo flujo se necesitará ahora que circule una corriente mayor que para el banco de 3 transformadores monofásicos. En consecuencia, el circuito equivalente homopolar de este transformador será como el de la Fig.4, pero con una impedancia  $Z_h$  menor (suele tomar un valor entre el 20 y el 100% de  $V_{1N}/I_{1N}$ ).

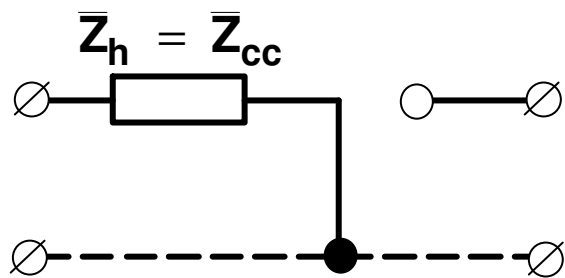
**Banco de tres transformadores monofásico Yd con el neutro a la red**

En este caso el ensayo de cortocircuito homopolar es el representado en la Fig. 5.

Cada transformador del banco queda en cortocircuito, pero la intensidad homopolar del secundario sólo circula por las fases (dentro del triángulo), pero no por la línea.



*Fig. 5: Ensayo de cortocircuito homopolar en un banco con conexión YNd*



*Fig. 6: Circuito equivalente homopolar de un banco YNd*

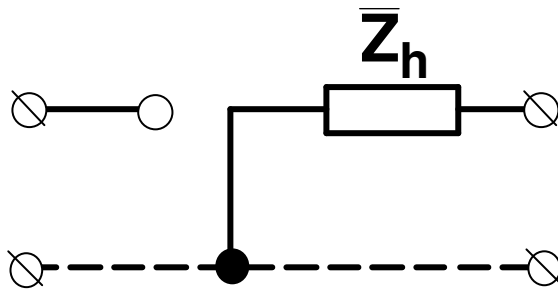
El circuito equivalente homopolar de este banco es, pues, el representado en la Fig. 6, el cuál también es válido para transformadores trifásicos de 5 columnas.

**Transformador trifásico de 3 columnas Yd con el neutro a la red**

El circuito equivalente homopolar de este transformador será como el de la Fig. 6, pero con una impedancia  $Z_h$  menor debido a que el flujo homopolar no se puede cerrar por el circuito magnético y debe hacerlo a través de un camino de alta reluctancia (el aire y la cuba del transformador).

**Transformación Dy con el neutro unido a la red**

Para obtener el circuito equivalente homopolar basta con invertir el correspondiente a la conexión YNd. Se obtiene, pues el circuito equivalente de la Fig. 7.



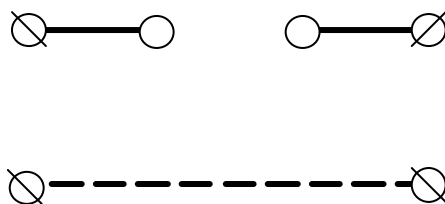
*Fig. 7: Circuito equivalente homopolar de un banco Dyn*

**Transformaciones Yd y Dy con el neutro aislado**

En este caso 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 3 y de 5 columnas.

Lo mismo sucede para la conexión Dy con el neutro aislado.

En consecuencia, para estas conexiones el circuito equivalente homopolar es el representado en la Fig. 8.



*Fig. 8: 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 trifásica.