

Impedancias de Secuencia en Transformadores.

1. Introducción.

Para el estudio de las redes en régimen desequilibrado es necesario disponer las impedancias de secuencia de los transformadores partes de las mismas.

Resulta evidente que las impedancias de los transformadores sensibles a la secuencia directa e inversa son iguales dado que la respuesta de un transformador a una red de secuencia directa o inversa es la misma, a menos del cambio en el desfase entre el primario y secundario.

Lo anterior se puede entender mejor si se releva el modelo de un transformador para el caso de ser excitado por una secuencia directa y una secuencia inversa. El resultado de los ensayos de vacío y de cortocircuito es el mismo para un caso y para el otro.

Si se desprecia la impedancia de vacío entonces se tiene:

$$\bar{Z}_d = \bar{Z}_i \cong \bar{Z}_{cc}$$

Distinta es la situación al considerar la respuesta de un transformador al ser excitado por una fuente de secuencia homopolar.

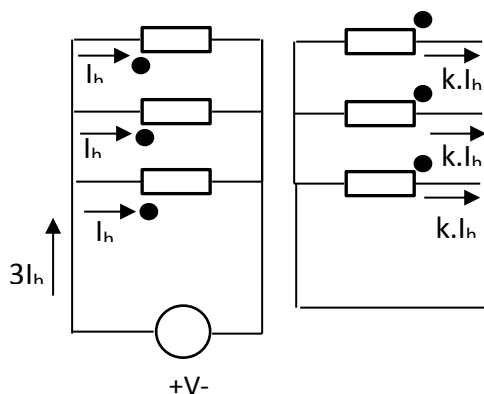
En un transformador trifásico la impedancia homopolar depende de:

- Grupo de conexión.
- Circuito magnético (tipo de núcleo).

A continuación se analizarán algunos casos como ejemplos más notorios dejando en evidencia la dependencia de la impedancia de secuencia homopolar con los dos puntos señalados anteriormente.

2. Banco de transformadores monofásicos para formar un transformador Yy con el neutro primario y secundario conectado.

A los efectos de relevar la impedancia de secuencia homopolar se realiza un ensayo de la unidad según la figura.

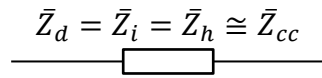


Los flujos homopolares pueden circular por el circuito magnético de cada transformador.

Resulta claro que este ensayo es equivalente a realizar el ensayo de cortocircuito a cada transformador monofásico en forma individual.

Luego: $\bar{Z}_d = \bar{Z}_i = \bar{Z}_h \cong \bar{Z}_{cc}$

Esquema equivalente:



3. Transformador con nucleo de 5 o 4 columnas conectado Yy con el neutro primario y secundario conectado.

El caso de un transformador Yy con el neutro primario y secundario conectado pero con núcleo de 5 columnas o 4 columnas el comportamiento es similar al ya analizado.

Conviene realizar la siguiente observación:

En un transformador monofásico en cortocircuito la mayor parte del flujo se cierra por el aire dado que el flujo secundario esta impuesto sea casi nulo ($j\omega N_2 \bar{\Phi} = R\bar{I}_2$); en general solo se considera el flujo por el aire lo cual equivale a considerar únicamente la impedancia de cortocircuito y despreciar la impedancia de vacío.

En un transformador de 4 o 5 columnas la situación es un poco diferente en el caso de un ensayo de cortocircuito alimentado por una fuente de secuencia directa o inversa que en el caso que se utilice una fuente homopolar.

En el caso de utilizar fuente de secuencia directo o inversa la situación es similar a la del transformador monofásico (caso ya analizado) el flujo es mayoritariamente de fugas y es correcto aproximar la impedancia vista por la impedancia de cortocircuito.

Si se realiza el ensayo para determinar la impedancia homopolar la situación cambia pues además de los flujos de fuga existe un camino para el flujo magnetizante por el hierro pero de mayor reluctancia que el normal (camino más largo por las columnas de retorno); esto hace que para un mismo flujo (impuesto por la tensión del ensayo) la corriente magnetizante sea mayor en este ensayo que en el de secuencia directa lo cual implica una reactancia magnetizante menor ($\bar{Z}_h = \frac{U_{cc}}{I} \cong jX$).

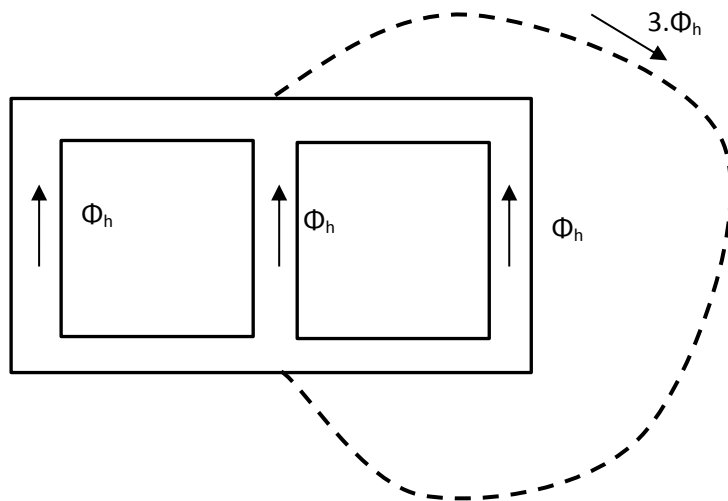
Para el nucleo de 4 o 5 columnas se tiene entonces que si bien la rama magnetizante, en el ensayo de secuencia homopolar, es alta, ya no lo es tanto como en el caso del banco de transformadores donde la rama magnetizante es del valor de la de secuencia directa (inversa).

Se concluye que para un transformador de 4 o 5 columnas: $X_{oh} < X_{od} = X_{oi}$

De todas formas es correcto aproximar la impedancia de secuencia homopolar por la impedancia de cortocircuito de secuencia directa.

4. Transformadores de núcleo plano de tres columnas conectado Yy con el neutro primario y secundario conectado.

Para un transformador con un núcleo de este tipo la observación realizada para el núcleo de 4 o 5 columnas se acentúa aún más pues ahora el flujo magnetizante (homopolar) se cierra ahora por el aire o por la cuba y aceite del transformador lo cual representa un camino de alta reluctancia.



Por lo mencionado anteriormente $L_h = \frac{N^2}{\mathcal{R}} \ll L_{cc}$

Ahora se tiene que en paralelo al camino del flujo de fugas existe un camino de flujo homopolar por el aire que puede ser del orden del flujo de fugas.

La tensión del ensayo impone ambos flujos; como ahora reluctancia del flujo homopolar no se puede despreciar, la corriente neta para establecer ambos flujos aumenta por tanto $\bar{Z}_h = \frac{U_{cc}}{I}$ tiene un valor menor comparado con los casos anteriores donde la impedancia homopolar se podía asimilar a la de cortocircuito de secuencia directa.

Se concluye que $\bar{Z}_h \ll \bar{Z}_d = \bar{Z}_i \cong \bar{Z}_{cc}$

En este caso el valor de la impedancia homopolar dependerá además de si el ensayo se realizó en el transformador en la cuba con aceite o fuera de la cuba; fuera de la cuba la diferencia de acentúa aún más.

Ejemplo:

Transformador trifásico en aceite núcleo plano de tres columnas Yy 6.3/0.22 kV 200 kVA.

Ensayo de vacío para la secuencia cero alimentado desde lado de baja.

Fuera de la cuba: $R_o = 0.022 \text{ Ohm}$, $X_o = 0.199 \text{ Ohm}$, $Z_o = 0.2 \text{ Ohm}$

Dentro de la cuba: $R_o = 0.055 \text{ Ohm}$, $X_o = 0.3 \text{ Ohm}$, $Z_o = 0.31 \text{ Ohm}$

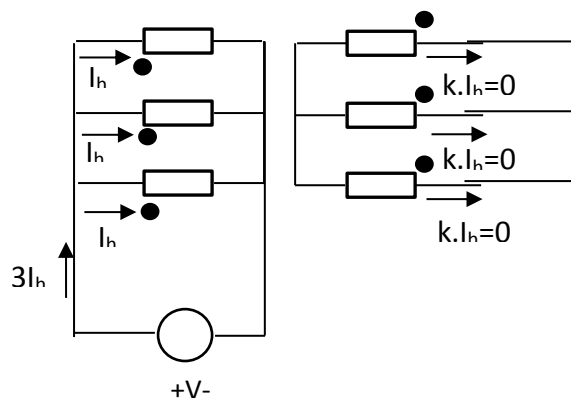
Observar:

- R_o aumenta cuando el transformador se ensaya dentro de la cuba pues al circular el flujo por la cuba aumentan las pérdidas de en el hierro.
- X_o aumenta cuando el transformador se ensaya dentro de la cuba pues baja la reluctancia del flujo homopolar (magnetizante)

Ensayo de cortocircuito: $R_{cc} = 0.0127 \text{ Ohm}$ $X_{cc} = 0.0248 \text{ Ohm}$ $Z_{cc} = 0.028 \text{ Ohm}$.

5. Banco de transformadores monofásicos para formar un transformador Yy con el neutro primario conectado (o secundario conectado).

Se analiza el caso del banco trifásico Yy en donde solo uno de los dos neutro se encuentra conectado a tierra.



En este caso cada las corrientes homopolares del lado donde no se conectó el neutro no tienen por donde circular por lo tanto serán nulas.

Es claro que el ensayo es equivalente a ensayar cada transformador en vacío.

El flujo magnetizante impuesto por la corriente de vacío circula por el núcleo de cada transformador

Luego la impedancia homopolar es la impedancia de vacío de cada transformador monofásico: $\bar{Z}_h \cong \bar{Z}_o \cong \infty$

6. Transformador con núcleo plano de tres columnas conectado Yy con el neutro primario conectado (o secundario conectado).

En este caso al igual que en el anterior las corrientes solo pueden circular del lado donde el neutro se encuentra conectado pero a diferencia del caso anterior el flujo magnetizante de cada columna debe circular por un camino de alta reluctancia impuesto por el aire o por la cuba y el aceite del transformador.

Luego como: $\mathcal{R}\phi = NI$ para lograr la misma corriente que en el caso anterior se necesita menor flujo para lo cual la tensión del ensayo debe ser menor y como $\bar{Z}_h = \frac{U_{cc}}{I} \cong jX$

La impedancia homopolar es menor que la magnetizante. Como referencia se puede asumir valores entre 20% y 100% tomando como base los valores nominales del transformador.

Para estos transformadores la impedancia homopolar tiene un valor alto pero esta lejos de poder considerarla infinito.

El valor de impedancia varía dependiendo de si el ensayo se realiza con el transformador dentro o fuera de la cuba.

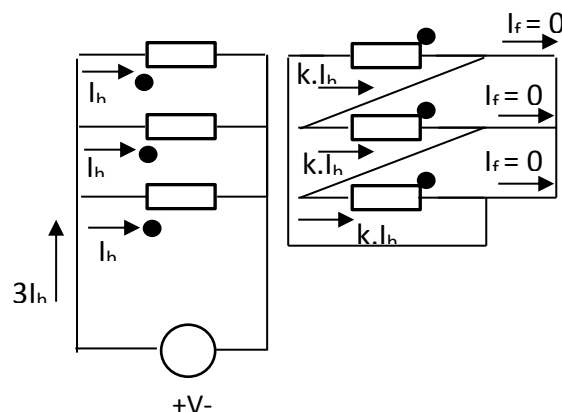
7. Conclusiones.

Para los casos estudiados se puede concluir:

- El valor de la impedancia de secuencia directo o inversa no es afectado por el tipo de núcleo del transformador.
- Los circuitos equivalentes de secuencia directa e inversa no presentan diferencias.
- Si no se conectan impedancias en los neutros el circuito equivalente de secuencia directa inversa y homopolar es el mismo para los bancos de transformadores.
- Si no se conectan impedancias en los neutros, en los transformadores de 4 o 5 columnas los circuitos equivalentes de secuencia directa, inversa y homopolar son iguales a pesar de que en los transformadores con núcleo de 4 o 5 columnas las impedancias magnetizantes son menores para el caso homopolar que para caso de secuencia directo e inversa (si se desprecia no se come error importante $Z_h = Z_{cc} // Z_0$).
- Parta los bancos de transformadores y transformadores de núcleo de 4 o 5 columnas las impedancias de secuencia directa, inversa y homopolar se pueden considerar iguales e igual a la impedancia de cortocircuito de secuencia directo (inversa)
- En el caso de transformadores con núcleo plano de tres columnas la impedancia de secuencia homopolar es menor que la impedancia de secuencia directa e inversa.

8. Transformador trifásico Yd a partir de tres transformadores monofásicos.

A los efectos de determinar la impedancia de secuencia homopolar aplica realizar un ensayo siguiendo el esquema propuesto en la siguiente figura:



Por el primario las corrientes circulan teniendo retorno por el neutro del transformador y en el secundario las corrientes circulan en el interior del triángulo siendo nulas las corrientes de línea.

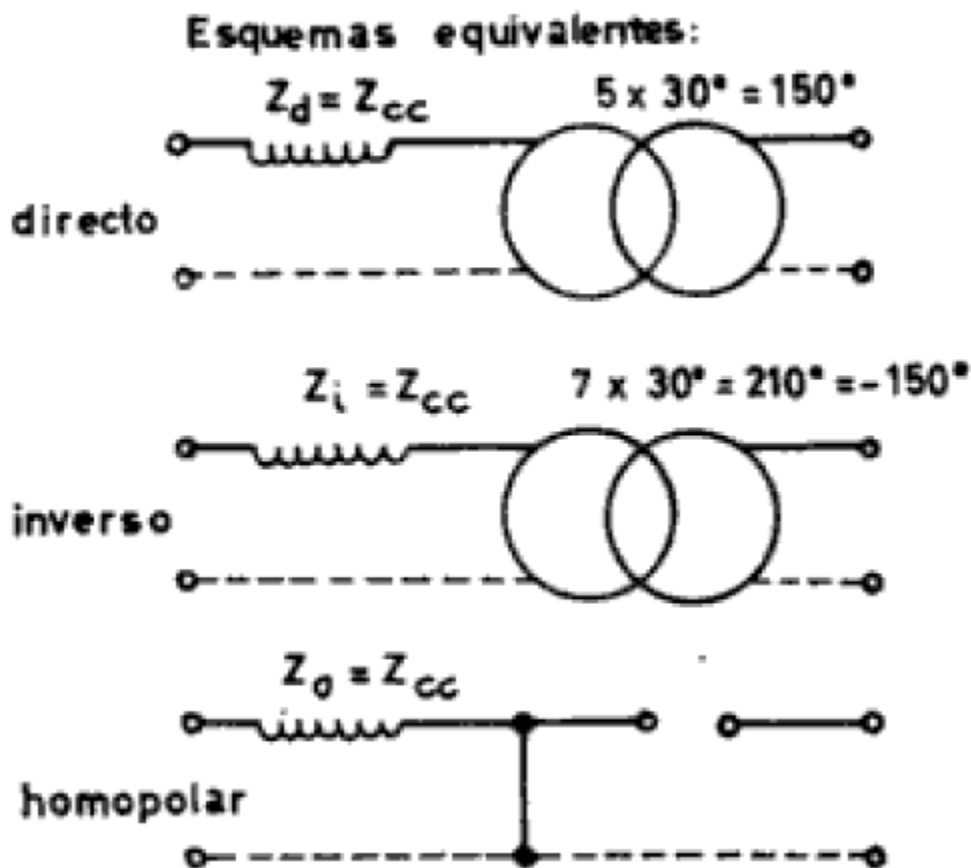
Se observa que cada fase secundaria se encuentra en corto circuito.

Por lo mencionado anteriormente se concluye que este ensayo es equivalente a realizar en forma individual un ensayo de cortocircuito a cada transformador monofásico.

Como resultado se tiene que: $\bar{Z}_d = \bar{Z}_i = \bar{Z}_h \cong \bar{Z}_{cc}$

En este caso se puede asumir que el flujo que circula es prácticamente el de fugas.

Ejemplo: transformador YNyn5



9. Transformador trifásico Yd a con núcleo de 5 o 4 columnas.

La situación es la misma que la analizada en el punto anterior y vale el análisis realizado en (3) para el flujo homopolar.

Se concluye que es posible seguir aproximando $\bar{Z}_d = \bar{Z}_i = \bar{Z}_h \cong \bar{Z}_{cc}$ a pesar de que la rama de vacío en paralelo con la de cortocircuito ya no tiene un valor tan alto.

10. Transformador trifásico Yd a con núcleo plano de tres columnas.

Lo que cambia en este caso es que ahora al igual que en el caso analizado en (4) es que el flujo magnetizante tiene un camino de alta reluctancia por lo cual ya no es posible despreciarlo.

Se puede decir que $\bar{Z}_h \cong \bar{Z}_{cc} // Z_{oh}$ siendo la impedancia de vacío homopolar de un valor menor a la impedancia de vacío directa e inversa; la impedancia homopolar resultante es menor que la impedancia de secuencia directa e inversa ($\bar{Z}_h \ll \bar{Z}_d = \bar{Z}_i \cong \bar{Z}_{cc}$)

Ejemplo:

Transformador YNd núcleo plano de tres columnas 165/10.5 kV, 36MVA

Ensayo de cortocircuito: $R_{cc} = 0.34\%$ $X_{cc} = 11.82\%$ $Z_{cc} = 11.83\%$

Impedancia secuencia cero (lado alta): $R_o = 0.91\%$, $Z_o = 9.7\%$

Se puede apreciar que la impedancia de secuencia cero es menor que la impedancia de cortocircuito.

11. Conclusiones.

- La impedancia de secuencia cero vista desde el secundario es un circuito abierto.
- De no conectarse impedancias en el neutro los valores de las impedancias de secuencia homopolar, directa e inversa es el mismo para transformadores formado por unidades monofásicas y núcleo de 4 o 5 columnas.
- Para transformadores de núcleo plano de tres columnas la impedancia homopolar es menor que la directa e inversa.
- El circuito de secuencia directa e inversa difieren en el desfase que introducen.