

UNIVERSIDAD CARLOS III DE MADRID
ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA ELÉCTRICA



Circuitos Magnéticos y Transformadores
Prácticas de Laboratorio

PRÁCTICA 4

**DETERMINACIÓN DE LA IMPEDANCIA HOMOPOLAR
DE UN TRANSFORMADOR TRIFÁSICO**

ÁNGEL RAMOS GÓMEZ

Indice

1. OBJETIVOS DE LA PRÁCTICA
2. INTRODUCCIÓN TEÓRICA
 - 2.1. Componentes simétricas
 - 2.2. Circuito equivalente ante secuencia homopolar de un transformador
 - 2.3. Ensayos para la medida de la impedancia homopolar
3. DESARROLLO DE LA PRÁCTICA
 - 3.1. Ensayo de vacío ante secuencia homopolar
 - 3.2. Primer ensayo de cortocircuito ante secuencia homopolar
 - 3.3. Segundo ensayo de cortocircuito ante secuencia homopolar
 - 3.4. Tercer ensayo de cortocircuito ante secuencia homopolar.
4. TIEMPOS PREVISTOS PARA LA PRÁCTICA
5. EVALUACIÓN DE LA PRÁCTICA

HOJA DE RESULTADOS

1. OBJETIVOS DE LA PRÁCTICA

Los principales objetivos de la Práctica 4 son:

- ✓ Conocer la topología del circuito equivalente ante secuencia homopolar de un transformador.
- ✓ Comprender los ensayos que se precisan para la obtención del circuito equivalente ante secuencia homopolar de un transformador Yyd.
- ✓ Obtener el circuito equivalente de un transformador ante secuencia homopolar a partir de los resultados de los ensayos.

2. INTRODUCCIÓN TEÓRICA

2.1. Componentes simétricas

Cuando una red eléctrica funciona en condiciones desequilibradas, las corrientes que circulan por las diferentes fases son sinusoides pero ni tienen el mismo valor eficaz ni están desfasadas 120°.

Para estudiar el comportamiento de esta red, se puede expresar el sistema desequilibrado como suma de tres sistemas equilibrados, uno de secuencia directa, otro de secuencia inversa y un tercero de secuencia homopolar.

- El sistema de secuencia directa está compuesto por tres intensidades idénticas y decaladas 120°, de tal forma que la intensidad de la fase S pulsa 120° en retraso de la de la fase R
- El sistema de secuencia inversa está compuesto por tres intensidades idénticas y decaladas 120°, de tal forma que la intensidad de la fase S pulsa 120° en avance respecto de la de la fase R
- El sistema de secuencia homopolar está compuesto por tres intensidades idénticas y que pulsan en fase

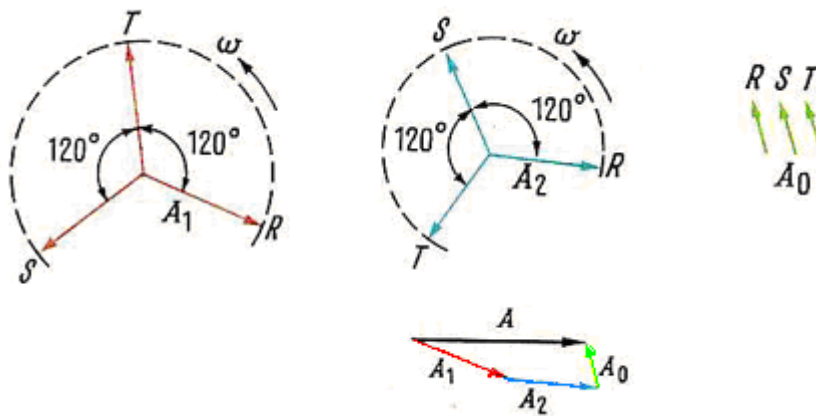


Figura 1: Descomposición de un sistema desequilibrado en redes de secuencia

Matemáticamente, esto se puede expresar de la forma:

$$\begin{pmatrix} \bar{I}_R \\ \bar{I}_S \\ \bar{I}_T \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \bar{I}_0 \\ \bar{I}_1 \\ \bar{I}_2 \end{pmatrix} \quad (1)$$

La respuesta del sistema se puede expresar en función de las respuestas ante cada uno de los sistemas: el sistema de secuencia directa, el sistema de secuencia inversa y el sistema de secuencia homopolar.

La respuesta de un transformador ante un sistema de secuencia directa (que es el único presente en un sistema eléctrico equilibrado) se puede obtener a través del circuito equivalente estudiado en la práctica 3. El circuito equivalente del transformador ante secuencia inversa es idéntico al de secuencia directa. Sin embargo, como se verá en el siguiente apartado, el circuito equivalente ante secuencia homopolar puede ser diferente de los anteriores.

2.2. Circuito equivalente ante secuencia homopolar de un transformador

El circuito equivalente ante secuencia homopolar de un transformador depende de:

- El grupo de conexión (Yy, Yd, Dy, etc)
- La puesta a tierra o no del neutro, en caso de arrollamientos en estrella (rígidamente puesto a tierra o aislado)
- El tipo de núcleo magnético (de tres columnas, de cinco columnas, acorazado o bancos monofásicos de transformación)

La topología del circuito equivalente depende de las dos primeras cuestiones y la magnitud de los parámetros depende de la tercera.

En un transformador de dos arrollamientos conectados en estrella con un arrollamiento terciario conectado en triángulo, es decir grupo de conexión Yyd, su circuito equivalente ante secuencia homopolar se puede representar por el esquema de la figura 2.

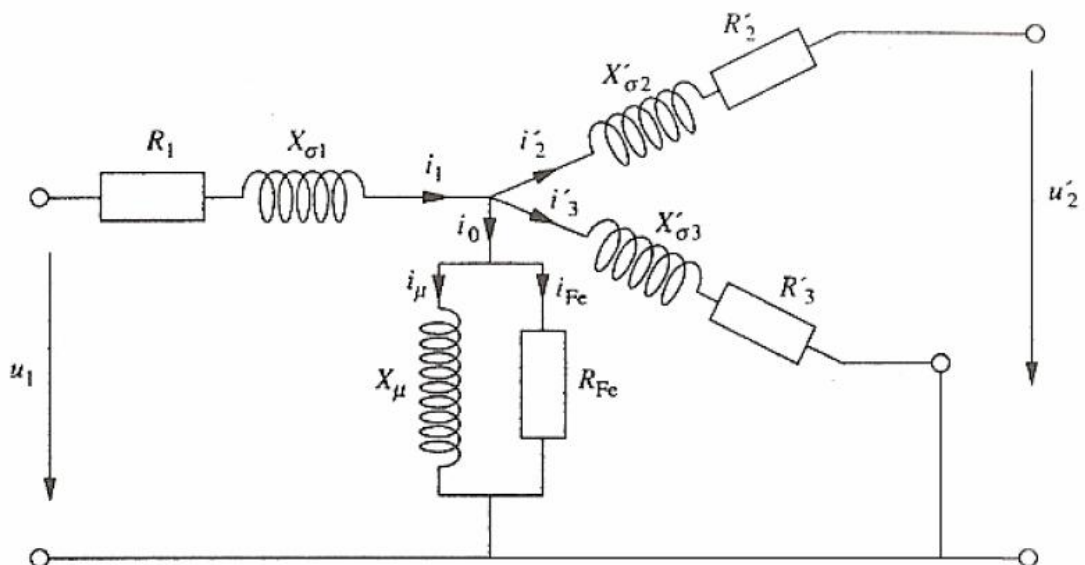


Figura 2: Circuito equivalente ante la secuencia homopolar de un transformador Yyd

El significado de las impedancias representadas en la figura 2 es el siguiente:

R_1 :	Resistencia del arrollamiento primario
$X_{\sigma 1}$:	Reactancia que tiene en cuenta el flujo homopolar que concatena al primario pero no al secundario ni al terciario
R'_2 :	Resistencia del arrollamiento secundario referido al primario
$X_{\sigma 2}$:	Reactancia que tiene en cuenta el flujo homopolar que concatena al secundario pero no al primario ni al terciario
R'_3 :	Resistencia del arrollamiento terciario referida al primario
$X_{\sigma 3}$:	Reactancia que tiene en cuenta el flujo homopolar que concatena al terciario pero no al primario o al secundario
R_{Fe} :	Resistencia que tiene en cuenta las pérdidas en el hierro del circuito magnético ante el flujo homopolar
X_{μ} :	Reactancia que tiene en cuenta la corriente que se precisa para crear el flujo homopolar común

Por simplicidad se desprecian los flujos de dispersión diferentes de los mencionados.

En la figura 2 la rama correspondiente al terciario aparece cerrada en cortocircuito, ya que las tensiones que se engendran en cada fase de dicho arrollamiento terciario se encuentran en fase y el triángulo es una figura cerrada que permite la circulación de corrientes por su interior aunque no haya carga alguna en bornas del terciario.

Como se indicó al principio de este apartado, la magnitud de la impedancia magnetizante depende del tipo de núcleo magnético del transformador. La razón de ello es la siguiente.

- Supongamos que se trate de un banco de transformación formado por tres unidades monofásicas. Que el transformador funcione con secuencia homopolar significa que las tensiones aplicadas a las tres fases son idénticas y pulsan en fase. En estas condiciones los flujos serán idénticos y pulsan en fase. Cada flujo circula por su unidad monofásica. Crear estos flujos no requiere mucha corriente, ya que cada una de las unidades tiene un circuito magnético de baja reluctancia. Como la intensidad magnetizante es reducida, la reactancia magnetizante será muy elevada.
- Supongamos ahora que se trate de un transformador de núcleo trifásico de tres columnas. Al igual que antes, los flujos en cada una de las fases son idénticos entre sí y en fase, como corresponde al funcionamiento ante secuencia homopolar. Ocurre que en un núcleo trifásico de tres columnas los flujos confluyen en un punto común (N en la figura 3). Como es sabido, en cualquier volumen del espacio el flujo entrante es igual al saliente. Pero los tres flujos que confluyen en N son tres sinusoides idénticas y en fase. Por tanto, el retorno de esos flujos debe producirse por fuera del núcleo magnético (en el caso de que el transformador tenga una cuba metálica se cerrarán por ella. La creación de estos flujos por la cuba atraviesan el aire (el aceite en el caso de transformadores de potencia) lo que requiere una intensidad muy elevada. Por tanto, la impedancia magnetizante (cociente entre tensión aplicada e intensidad consumida) es muy pequeña, a diferencia de lo que ocurre en el caso de secuencia directa.

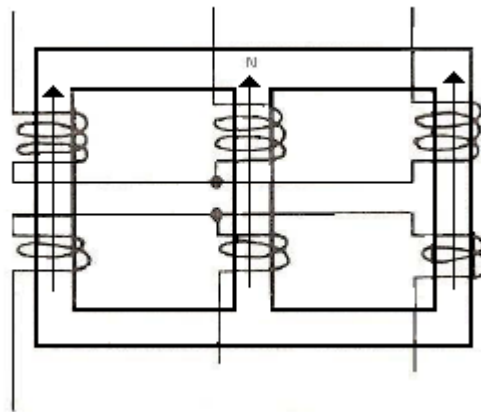


Figura 3: Circuito magnético de un transformador de tres columnas

2.3. Ensayos para la medida de la impedancia homopolar

El valor de la impedancia homopolar de un transformador trifásico, vista desde su lado primario o desde su lado secundario, se puede obtener a partir de un ensayo consistente en alimentar las tres fases con una misma tensión (igual magnitud y fase), tal y como se indica en la figura 4:

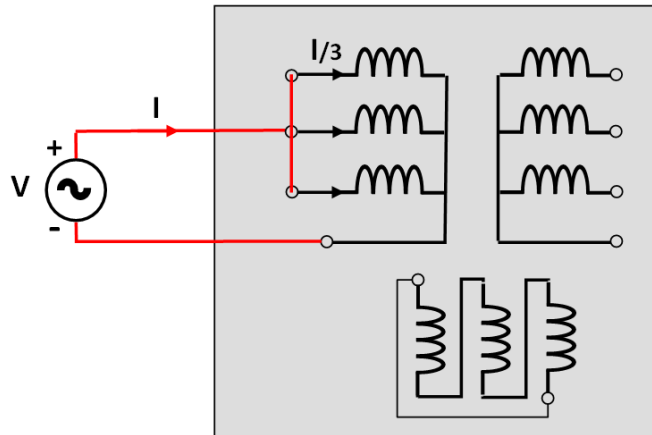


Figura 4: Circuito para la medida de la impedancia homopolar

Siendo V el valor de la tensión aplicada con la fuente de alimentación e I el valor de la corriente aportada por ella, la impedancia homopolar por fase del transformador visto por la red desde el lado alimentado vendrá dado por la expresión:

$$Z_0 = 3 \cdot V / I \quad (2)$$

Es importante observar que el circuito de medida de la impedancia homopolar precisa alimentar el transformador desde unos arrollamientos conectados en estrella. La impedancia homopolar vista desde un lado del transformador con arrollamientos conectados en triángulo tendrá un valor infinito, ya que las corrientes homopolares de las tres fases no pueden disponer de un conductor de neutro por el que cerrarse.

Por otro lado, el valor de la impedancia homopolar dependerá, no sólo del lado desde el que se alimenta el transformador (necesariamente conectado en estrella), sino también del tipo de núcleo magnético, de la forma de conexión de los otros arrollamientos (estrella o triángulo) y, en caso de estar conectados en estrella, si se encuentran en vacío o en cortocircuito.

La afirmación anterior se deduce también de forma clara a partir del modelo de comportamiento homopolar del transformador reflejado por el circuito equivalente mostrado en la figura 2.

A partir de dicho circuito equivalente se puede deducir, por ejemplo, que la impedancia homopolar medida en un transformador Yyd cuando se alimenta el arrollamiento primario en estrella con el arrollamiento secundario en estrella a circuito abierto y el arrollamiento terciario en triángulo con dicho triángulo cerrado la podemos expresar en términos de las impedancias del circuito equivalente como:

$$Z_0 = Z_1 + Z_m // Z_3 \quad (3)$$

En el caso de los arrollamientos en triángulo, como ya se ha indicado, la corriente de línea no puede contener corriente de secuencia homopolar, pero por el interior del triángulo sí que puede circular dicha corriente. Si se realizase la apertura del triángulo (es decir, abrir la conexión de algún principio con algún final de bobina) tampoco podría circular corriente homopolar por el interior del triángulo. Así, por ejemplo, si realizamos un ensayo de impedancia homopolar desde el lado secundario de un transformador Yyd con el arrollamiento primario cortocircuitado y el arrollamiento terciario con el triángulo abierto tendremos que:

$$Z_0 = Z_2 + Z_m // Z_1 \quad (4)$$

Nota sobre la utilización industrial de transformadores: La posibilidad de dejar el arrollamiento terciario en triángulo, mencionada en el párrafo anterior, si bien no es habitual, es perfectamente posible en la realidad ya que muchos de los usuarios suelen especificar dicho arrollamiento con al menos dos bornas accesibles desde el exterior entre las que se realiza el cierre del triángulo. No ocurriría lo mismo en caso de que fuera alguno de los arrollamientos primario o secundario el que estuviera conexionado en triángulo, ya que en estos casos no se dispone de la posibilidad de apertura/cierre externo del triángulo.

3. DESARROLLO DE LA PRÁCTICA

Para el desarrollo de la práctica se conexionará el transformador trifásico con una configuración Yyd, según se indica en la figura 5.

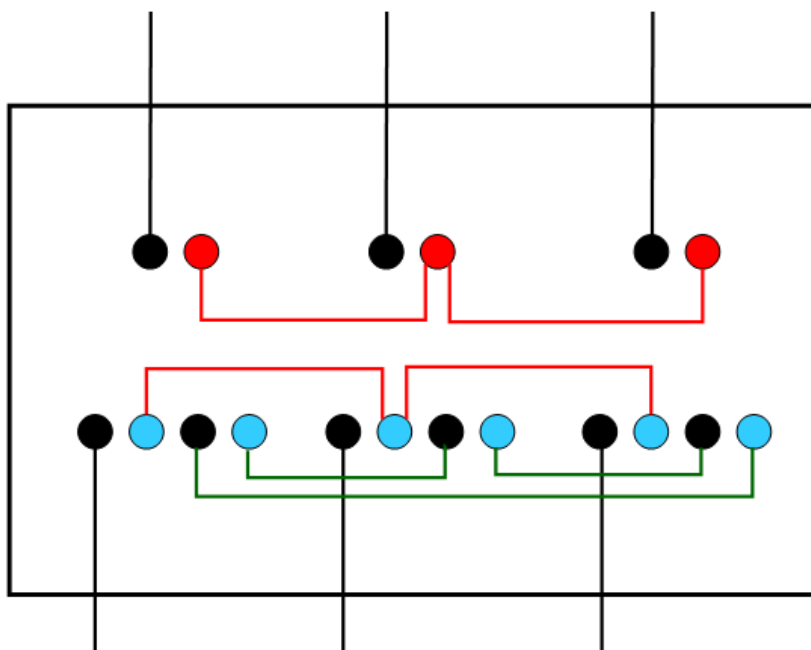


Figura 5: Conexionado del transformador trifásico

En la primera parte de la práctica se van a realizar los diferentes ensayos de impedancia homopolar que se pueden realizar sobre el transformador.

Por otro lado, en la segunda parte de la práctica, se determinarán los parámetros del circuito equivalente a secuencia homopolar a partir de las medidas obtenidas en los ensayos.

3.1. Ensayos de impedancia homopolar de un transformador Yyd

Como se ha indicado anteriormente, la medida de la impedancia homopolar debe realizarse alimentando con una misma tensión las tres fases de un arrollamiento conectado en estrella.

Por tanto, en el caso de un transformador Yyd se realizarán los diferentes ensayos alimentando el transformador desde el lado primario y desde el lado secundario. En cada uno de los casos, se contemplarán todas las posibles combinaciones de los otros arrollamientos (arrollamiento en vacío o en cortocircuito para el arrollamiento en estrella y triángulo abierto o cerrado para el arrollamiento en triángulo).

A continuación se indican algunas consideraciones generales que deberán ser tenidas en cuenta en todos los ensayos:

- La tensión a aplicar en los distintos ensayos se irá subiendo muy poco a poco, teniendo en cuenta que no se deberá superar en ningún momento la intensidad máxima admisible de los arrollamientos. Dicha intensidad máxima admisible por fase es de 3 A para los arrollamientos secundario y terciario y de 1,73 A para el arrollamiento primario. Dado que la medida de intensidad se realizará como la intensidad suministrada por la fuente, las máximas corrientes que deberán medirse son 5,2 A y 9 A para los ensayos realizados alimentando, respectivamente, el lado primario y secundario.
- Para cada uno de los ensayos se realizarán medidas a tres pares de valores V-I. El objetivo de ello es comprobar si el comportamiento de la impedancia homopolar es o no lineal.
- El valor numérico de la impedancia homopolar por fase para cada uno de los ensayos se calculará como el valor medio de las tres impedancias homopolares obtenidas de las medidas, que a su vez se calcularán a partir de la expresión (2).
- En los ensayos en los que se deba cortocircuitar un arrollamiento en estrella, se tendrá en cuenta que, no sólo se deben cortocircuitar los terminales de línea (como ocurría en los ensayos de cortocircuito a secuencia directa), sino también se debe cortocircuitar con el terminal de neutro.

En la tabla y las figuras siguientes se representan respectivamente las conexiones, las medidas, los cálculos y los esquemas de los diferentes ensayos a realizar:

Ensayo	Arrollam. primario	Arrollam. secundario	Arrollam. terciario	V	I	W	Z ₀	Z ₀ media
1	Alimentado	En vacío	Abierto					
2	Alimentado	En vacío	Cerrado					
3	Alimentado	En cortocircuito	Abierto					
4	Alimentado	En cortocircuito	Cerrado					
5	En vacío	Alimentado	Abierto					
6	En vacío	Alimentado	Cerrado					
7	En cortocircuito	Alimentado	Abierto					
8	En cortocircuito	Alimentado	Cerrado					

Tabla 1: Conexiones, medidas y cálculos a realizar para la caracterización del comportamiento homopolar del transformador Yyd

En el informe de la práctica, para cada uno de los ensayos, se representarán en una gráfica V-I los tres pares valores medidos, comprobando si puede o no puede considerarse lineal el comportamiento de la impedancia homopolar.

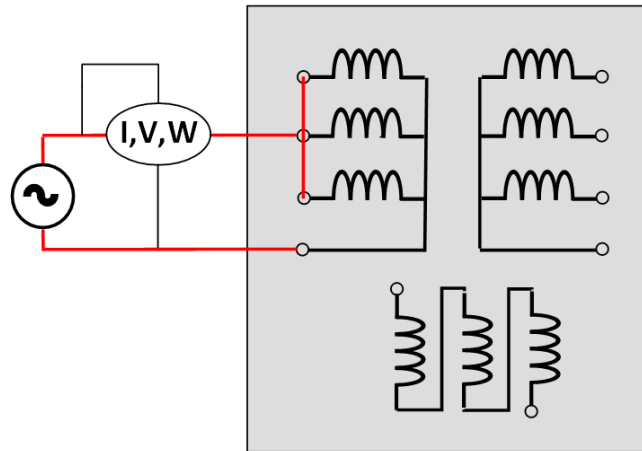


Figura 6-1: Ensayo 1 de medida de la impedancia homopolar

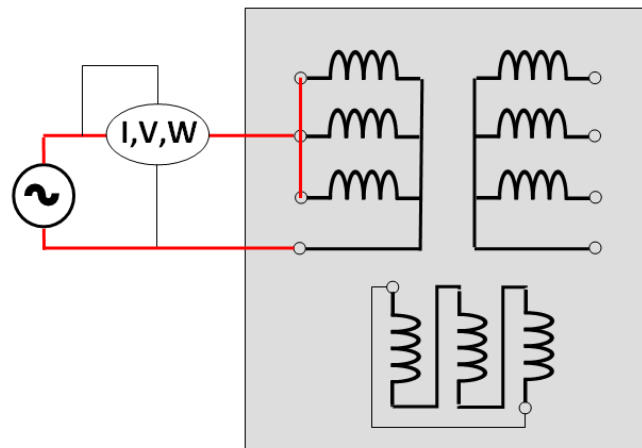


Figura 6-2: Ensayo 2 de medida de la impedancia homopolar

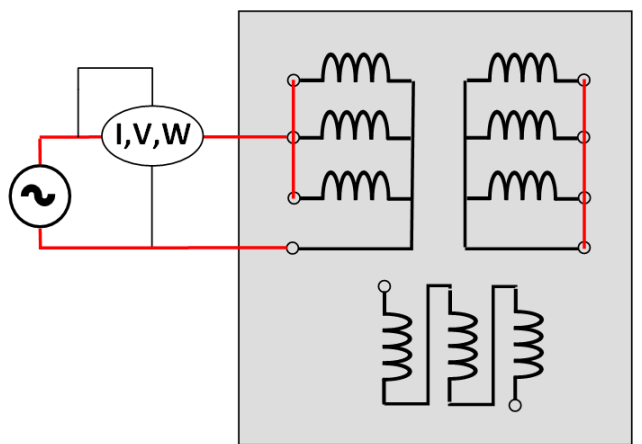


Figura 6-3: Ensayo 3 de medida de la impedancia homopolar

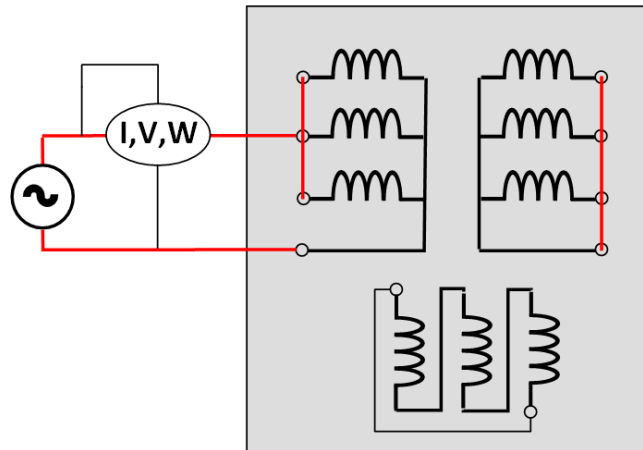


Figura 6-4: Ensayo 4 de medida de la impedancia homopolar

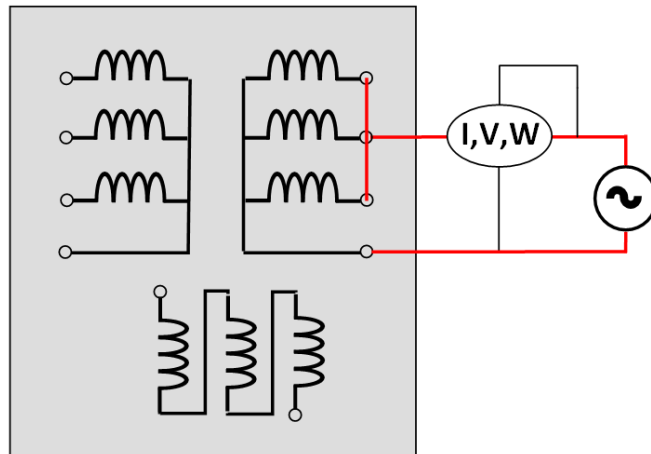


Figura 6-5: Ensayo 5 de medida de la impedancia homopolar

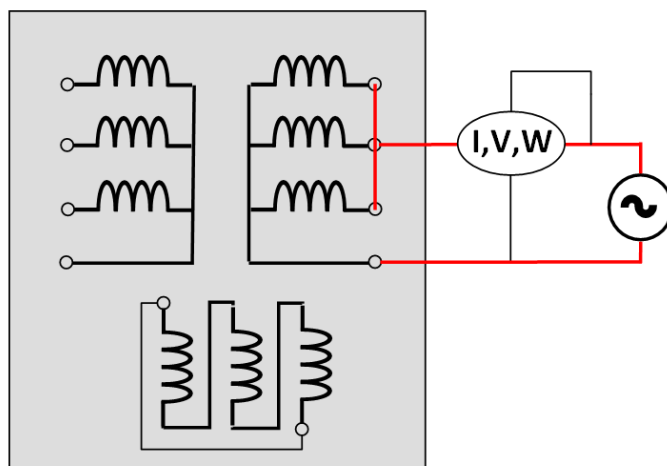


Figura 6-6: Ensayo 6 de medida de la impedancia homopolar

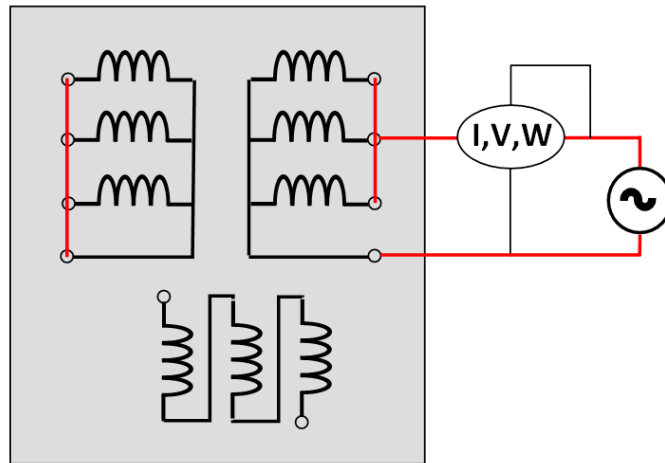


Figura 6-7: Ensayo 7 de medida de la impedancia homopolar

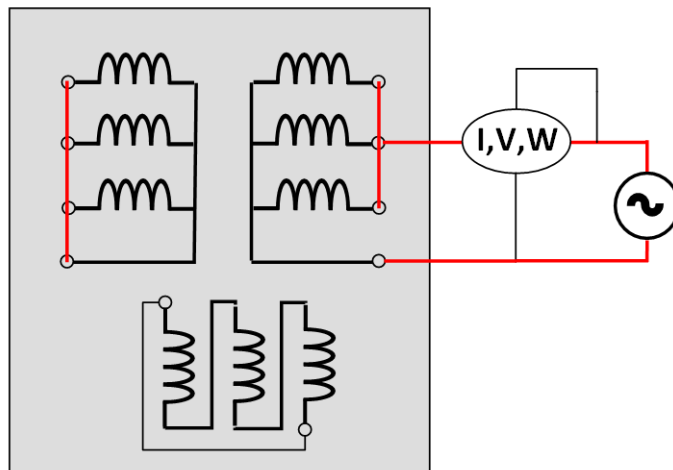


Figura 6-8: Ensayo 8 de medida de la impedancia homopolar

3.2. Determinación de las impedancias del circuito equivalente ante secuencia homopolar

A partir de las medidas realizadas y de los valores calculados de la impedancia homopolar para cada uno de los ensayos es posible determinar los parámetros del circuito equivalente de la figura 2.

Para una mayor simplicidad y mejor comprensión de los conceptos se calcularán los valores de los módulos de las impedancias (Z_1 , Z_2 , Z_3 y Z_m) del circuito equivalente, sin distinguir entre las componentes resistivas y las componentes reactivas.

Par ello, se tendrán en cuenta las expresiones para cada uno de los ensayos de la impedancia homopolar vista desde el lado alimentado en términos de las impedancias del circuito equivalente, tal y como se indican en la tabla 2:

Ensayo	Impedancia homopolar vista desde el lado alimentado
1	$Z_0 = Z_1 + Z_m$
2	$Z_0 = Z_1 + Z_m // Z_3$
3	$Z_0 = Z_1 + Z_m // Z_2$
4	$Z_0 = Z_1 + Z_m // Z_2 // Z_3$
5	$Z_0 = Z_2 + Z_m$
6	$Z_0 = Z_2 + Z_m // Z_3$
7	$Z_0 = Z_2 + Z_m // Z_1$
8	$Z_0 = Z_2 + Z_m // Z_1 // Z_3$

Tabla 2: Impedancia homopolar vista desde el lado alimentado en términos de las impedancias del circuito equivalente de la figura 2

Teniendo en cuenta los valores medidos de las impedancias homopolares para cada uno de los ensayos definidos en la tabla 1, así como las expresiones que relacionan dichas medidas con los parámetros Z_1 , Z_2 , Z_3 y Z_m del circuito equivalente definidas en la tabla 2, la obtención de dichos parámetros implicaría la resolución de un sistema de 8 ecuaciones con 4 incógnitas. Para ello nos quedaríamos con 4 de las ecuaciones con las que resolveríamos un sistema de 4 ecuaciones con 4 incógnitas, y comprobaríamos que las incógnitas así obtenidas satisfacen las ecuaciones no utilizadas.

Actuar de la forma descrita en la práctica industrial, implica la utilización de herramientas matemáticas informáticas para la resolución del sistema de ecuaciones y se comprueba que no existe un conjunto de parámetros que satisfagan adecuadamente todas las ecuaciones.

Ello es debido a que el modelo de comportamiento de un transformador ante secuencia homopolar descrito por el circuito equivalente de la figura 2, si bien es de gran utilidad para una comprensión didáctica del problema, no representa adecuadamente el comportamiento real de un transformador de 3 arrollamientos en todas las situaciones.

De cara a solventar ambas cuestiones (la dificultad matemática y la falta de adecuación del modelo a todas las situaciones), se va a desdoblarse el modelo de comportamiento en dos circuitos equivalentes.

En el primero de los circuitos equivalentes representaremos el comportamiento del transformador sin considerar el arrollamiento terciario (lo que es equivalente a disponer del arrollamiento terciario con el triángulo abierto):

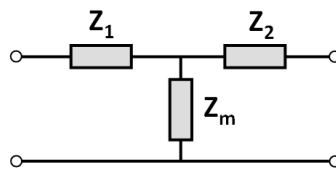


Figura 7: Circuito equivalente sin considerar arrollamiento terciario

La obtención de los parámetros del circuito equivalente de la figura 7 se realizará a partir de las medidas y las ecuaciones de los ensayos impares (ensayos 1, 3, 5 y 7) definidos en las tablas 1 y 2 respectivamente. Con tres de las cuatro ecuaciones se obtendrán los tres parámetros (Z_1 , Z_2 y Z_m), y con la cuarta ecuación se contrastará la validez del modelo.

Por otro lado, consideraremos un segundo circuito equivalente en el que representaremos el comportamiento del transformador con el arrollamiento terciario (lo que es equivalente a disponer del arrollamiento terciario con el triángulo cerrado), despreciando el efecto de la rama magnetizante:

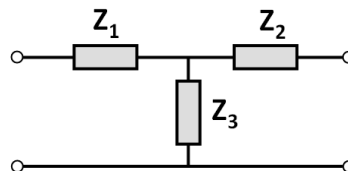


Figura 8: Circuito equivalente considerando arrollamiento terciario y despreciando la rama magnetizante

La obtención de los parámetros del circuito equivalente de la figura 8 se realizará a partir de las medidas de los ensayos pares (ensayos 2, 4, 6 y 8) definidas en la tabla 1 y las ecuaciones de dichos ensayos en la tabla 2 simplificadas de forma que se considere que $Z_m/Z_3 \approx Z_3$. Con tres de las cuatro ecuaciones se obtendrán los tres parámetros (Z_1 , Z_2 y Z_3), y con la cuarta ecuación se contrastará la validez del modelo.

En la obtención de los parámetros de los circuitos equivalentes de las figuras 7 y 8 puede ocurrir que alguna de las impedancias adopte un valor negativo. Ello es compatible con la validez de modelo, a pesar de que no supone la representación de un fenómeno físico real.

Nota sobre la utilización industrial de transformadores: La consideración de un modelo de comportamiento homopolar de transformadores Yyd por medio de dos circuitos equivalentes es perfectamente admisible, ya que durante su explotación los transformadores operan normalmente con el arrollamiento terciario cerrado. La apertura de dicho terciario requeriría necesariamente la previa desenergización del transformador. Es decir, en una determinada situación de explotación, no son posibles ambas situaciones simultáneamente. Por otro lado, la hipótesis de considerar despreciable la rama magnetizante frente a la impedancia del arrollamiento terciario también se contrasta de forma adecuada con ensayos realizados en los transformadores de potencia.

4. TIEMPOS PREVISTOS PARA LA PRÁCTICA

A continuación se indican las duraciones previstas para cada una de las partes de la práctica:

Concepto	Duración prevista
Explicaciones iniciales del profesor	10 minutos
Conexionado del transformador	10 minutos
Ensayos de impedancia homopolar	30 minutos
Cálculo de las impedancias homopolares	10 minutos

5. EVALUACIÓN DE LA PRÁCTICA

La evaluación de la práctica será realizada de acuerdo a los criterios indicados en el apartado 4.1 del documento "Aspectos generales de las prácticas de Circuitos Magnéticos y Transformadores", otorgando el siguiente peso a cada una de las partes:

Concepto	Peso en la evaluación
Examen laboratorio	30 %
Informe de la práctica	40 %
Examen teórico	30 %

En el informe de la práctica (que deberá ser entregado en el plazo de una semana a partir de la realización de la misma) el alumno realizará un análisis de los resultados de los ensayos realizados, presentando los valores de la impedancia homopolar tanto de forma tabulada para el conjunto de los ensayos, como de forma gráfica para cada uno de los ensayos. Por otra parte, se calcularán los parámetros de los circuitos equivalentes de las figuras 7 y 8, y se indicará si el modelo refleja adecuadamente la realidad de las medidas obtenidas en los ensayos.

Adicionalmente, en aquellos casos en los que el alumno lo considere oportuno (ya sea porque le haya llamado la atención, porque las medidas parezcan erróneas, etc.), se podrán incluir en el informe de la práctica observaciones sobre las medidas o los cálculos efectuados.

HOJA DE RESULTADOS - PRÁCTICA 4

FECHA:

PUESTO:

ENSAYOS DE IMPEDANCIA HOMOPOLAR

Ensayo	Arrollam. primario	Arrollam. secundario	Arrollam. terciario	V	I	W	Z ₀	Z ₀ media
1	Alimentado	En vacío	Abierto					
2	Alimentado	En vacío	Cerrado					
3	Alimentado	En cortocircuito	Abierto					
4	Alimentado	En cortocircuito	Cerrado					
5	En vacío	Alimentado	Abierto					
6	En vacío	Alimentado	Cerrado					
7	En cortocircuito	Alimentado	Abierto					
8	En cortocircuito	Alimentado	Cerrado					