



INSTITUTO DE INGENIERÍA ELÉCTRICA  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
UNIVERSIDAD DE LA REPÚBLICA



# Taller de Máquinas Eléctricas

Práctica: Transformadores y Redes de Secuencia  
Instructivo

Curso 2017

# Índice

<b>Índice</b>	<b>2</b>
<b>1. Objetivos de la práctica</b>	<b>3</b>
<b>2. Descripción de los equipos</b>	<b>3</b>
2.1. Máquina a ensayar - Generalidades . . . . .	3
2.2. Regulador de inducción . . . . .	4
2.3. Transformadores auxiliares . . . . .	4
<b>3. Conexiones a estudiar</b>	<b>5</b>
<b>4. Ensayos a realizar</b>	<b>5</b>
4.1. Conexión YYD11 . . . . .	5
4.1.1. Relación de transformación . . . . .	5
4.1.2. Determinación de los puntos de los bobinados . . . . .	6
4.1.3. Medida de la resistencia de bobinados en frío . . . . .	6
4.1.4. Verificación del índice horario . . . . .	6
4.1.5. Relevamiento de la curva de saturación . . . . .	6
4.1.6. Ensayos de vacío en secuencia positiva . . . . .	7
4.1.7. Ensayos de cortocircuito en secuencia positiva . . . . .	7
4.1.8. Ensayos de cortocircuito en secuencia cero . . . . .	7
4.1.9. Ensayos de vacío en secuencia cero . . . . .	9
4.2. Conexión Zig-Zag . . . . .	9
<b>5. Documentación a entregar</b>	<b>10</b>
5.1. Preinforme . . . . .	10
5.2. Informe . . . . .	11

## 1. Objetivos de la práctica

1. Familiarizar al estudiante con los transformadores de potencia, en particular con los transformadores trifásicos, introducir/repasar el concepto de redes de secuencia y como este se aplica al modelado de los transformadores.
2. Comprender los diferentes comportamientos de los transformadores ante una componente de secuencia cero en función de su conexionado y del tipo de núcleo.
3. Comprender el impacto del tipo de transformador a utilizar ante un cortocircuito en el sistema eléctrico.
4. Implementar diferentes conexionados de transformadores trifásicos(estrella-estrella, estrella-triángulo, zig-zag, estrella-estrella-triángulo, etc.) y modelar los mismo en base a la realización de ensayos. Se realizarán ensayos tanto en secuencia positiva como en secuencia cero.

## 2. Descripción de los equipos

### 2.1. Máquina a ensayar - Generalidades

Para la práctica se utilizará un transformador seco, de tres columnas, con tres arrollamientos y con sus 18 bornes accesibles. El transformador utilizado para la práctica formaba parte de una equipo que fue desmantelado, por lo cual no cuenta con una chapa característica. Debido a ello para la realización de esta práctica asumiremos los siguientes valores como "nominales" para esta máquina:

- Potencia→100kVA
- Tensión→230V(primarios)

Recordemos que el objetivo de la práctica no es determinar los parámetros exactos de este equipo, sino comprender cualitativamente:

- Como se determinan los parámetros que caracterizan a un transformador para su modelado eléctrico.
- Como dichos parámetros varían de acuerdo a su conexionado.
- Cual es el efecto del conexionado de las bobinas sobre el comportamiento en vacío del transformador.



Figura 1: Transformador trifásico de tres arrollamientos a ser ensayado.

## 2.2. Regulador de inducción

Dado que los ensayos a realizar necesitan de diferentes niveles de tensión para su implementación es necesario contar con una fuente de tensión variable, en esta práctica utilizaremos un regulador de inducción para este fin. El regulador será utilizado en el rango 0-110 V durante toda la práctica con excepción del ensayo de vacío. A su vez el regulador se encontrará conectado al transformador bajo ensayo a través de un transformador auxiliar durante prácticamente toda la práctica.

## 2.3. Transformadores auxiliares

Debido a que el regulador de inducción tiene una corriente nominal inferior a la corriente necesario para ensayar el transformador en cuestión y que a bajas tensiones presenta una distorsión armónica importante, se utilizará un transformador auxiliar de forma tal de que el regulador de inducción no supere su corriente nominal y que la tensión aplicada sobre el transformador a ensayar presente un menor contenido armónico. Este transformador será utilizado en todos los ensayos excepto el ensayo asociado al conexionado ZIG-ZAG.



Figura 2: Transformador trifásico, para interconectar el regulador con el transformador a ser ensayado.

Para el ensayo del transformador con conexión ZIG-ZAG se utilizará un banco de transformadores monofásicos, el cual nos permitirán generar un neutro ficticio, necesario para este ensayo.

### 3. Conexionados a estudiar

Para la realización de la práctica se cuenta con un transformador trifásico seco, de tres columnas, con tres arrollamientos y con sus dieciocho bornes accesibles. Dicho transformador permite una gran variedad de conexiones, para esta práctica se utilizarán las siguientes conexiones:

- YnYD11, YnYnD11, YnYn
- ZZ (en este caso no se utiliza el tercer bobinado)

### 4. Ensayos a realizar

Se realizarán ensayos con diferentes conexionados, tal cual se indica en el punto anterior. Estos ensayos involucran tanto ensayos en secuencia positiva como ensayos en secuencia cero. Para la realización de estos ensayos se tomará como referencia la norma IEEE Std C57.12.91-2001<sup>1</sup>.

#### 4.1. Conexión YYD11

##### 4.1.1. Relación de transformación

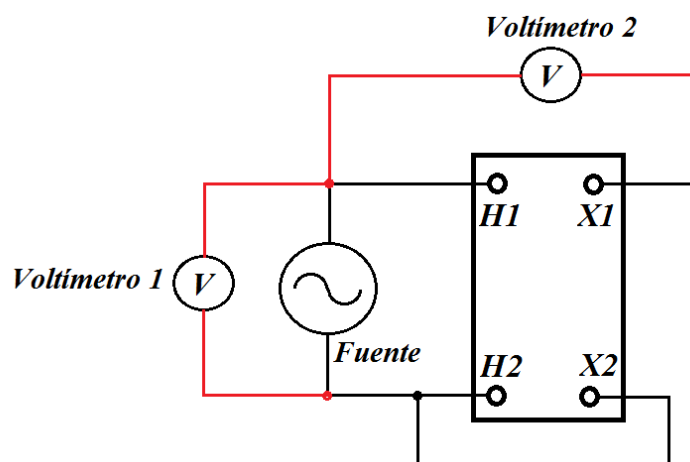
Antes de implementar la conexión YYD11, se alimentará el transformador en uno de sus bobinados a la tensión nominal y se medirán las tensiones en cada fase, primario y secundario determinándose así la relación de

<sup>1</sup>La norma se puede descargar de forma gratuita desde el IEEEXplore a través del portal Timbo.

transformación de cada bobinado.

#### 4.1.2. Determinación de los puntos de los bobinados

Se deberá determinar la ubicación de los puntos de las bobinas, para lo cual se utilizará el ensayo de polaridad en corriente alterna. El ensayo será realizado en una sola de las fases para simplificar las medidas. Para la realización de este ensayo se conectarán las bobinas primarias y secundarias en serie, luego alimentando una de las bobinas con una tensión “V” y midiendo la tensión entre los extremos de la serie se determina si la tensión de la bobina 1 y 2 se está sumando o restando y por lo tanto la ubicación de los puntos en las mismas.



**PRIMARIO: H1, H2**  
**SECUNDARIO: X1, X2**

Figura 3: Diagrama simplificado del sistema.

#### 4.1.3. Medida de la resistencia de bobinados en frío

Se deberá realizar la medida de la resistencia de cada uno de los bobinados en frío. Para estos se seguirán las recomendaciones de la norma antes mencionada y se utilizará el método volt-amperimétrico.

#### 4.1.4. Verificación del índice horario

Primero se procederá a conectar el transformador con el grupo de conexión indicado, para esto se tomará en cuenta la ubicación de los puntos determinada previamente. Posteriormente se verificará el índice horario con el cual se ha conectado el transformador. Conectar el transformador con el siguiente grupo de conexión YYD11 y verificar el índice horario del transformador, tanto en secuencia directa como en secuencia inversa. Para esto se utilizará un osciloscopio, en el cual se conectarán las tensiones que se quieren evaluar en cada uno de los canales, midiendo así el desfase de ambas señales. Finalmente alimentar el bobinado primario con una tensión reducida y observar el desfase de las otras dos tensiones.

Realizar este ensayo con una red de secuencia positiva y con una red de secuencia inversa.

#### 4.1.5. Relevamiento de la curva de saturación

Para relevar la curva de saturación de un transformador se alimenta desde el primario del transformador, dejando los otros dos bobinados en vacío. Se comenzará con una tensión reducida y se irá incrementando la

misma hasta observar la saturación del núcleo. Tener en cuenta que el rango de tensiones para el cual se podrá realizar el ensayo estará dado por los límites de corriente impuestos por el equipamiento a utilizar, esto deberá ser controlado durante la práctica.

#### 4.1.6. Ensayos de vacío en secuencia positiva

Mediante un circuito de medida de potencia trifásica, se alimentará el transformador a la tensión nominal  $V_n$  y con el secundario en circuito abierto, se procederá a determinar los parámetros necesarios.

Se estimará porcentualmente que error puede cometerse al no tener presente la caída de tensión producida en el circuito primario, como también las pérdidas Joule y si es razonable despreciarlas a nivel del ensayo que se realiza.

#### 4.1.7. Ensayos de cortocircuito en secuencia positiva

Como la alimentación al transformador debe hacerse en tensiones reducidas, del orden de un 5 % de  $V_n$  y la corriente que circulará será importante, se deberá utilizar el regulador de tensión conjuntamente con un transformador auxiliar que nos permita disminuir la tensión. La conexión de cortocircuito en el secundario y terciario del transformador se realizará mediante una barra ofreciendo baja resistencia y buen contacto para evitar introducir resistencias no deseadas en el circuito secundario que puedan alterar los resultados y causar recalentamientos.

No confundir este ensayo con el ensayo de cortocircuito descrito en la norma, este ensayo es el definido en el punto 9.4 de la mencionada norma.

#### 4.1.8. Ensayos de cortocircuito en secuencia cero

La idea de este ensayo es observar como varía el comportamiento de un transformador, en particular el valor de su impedancia de cortocircuito, al estar alimentado con una fuente de secuencia cero en función del conexionado del mismo. Para ello se realizará el ensayo de cortocircuito primario-secundario bajo diferentes configuraciones, en particular se variará el "aterramiento" y por último se evaluará el efecto de poseer un bobinado de estabilización conectado en triángulo.

Primero supondremos que el transformador está aterrado tanto en su secundario como en su primario y con su terciario conectado en triángulo, con lo cual existe un camino para las corrientes de secuencia cero del transformador. Para emular esta situación se realizará la conexión indicada en la Figura 4. Este mismo ensayo debe realizarse alimentando el transformador desde el secundario, dejando en vacío al primario y cortocircuitando el terciario.

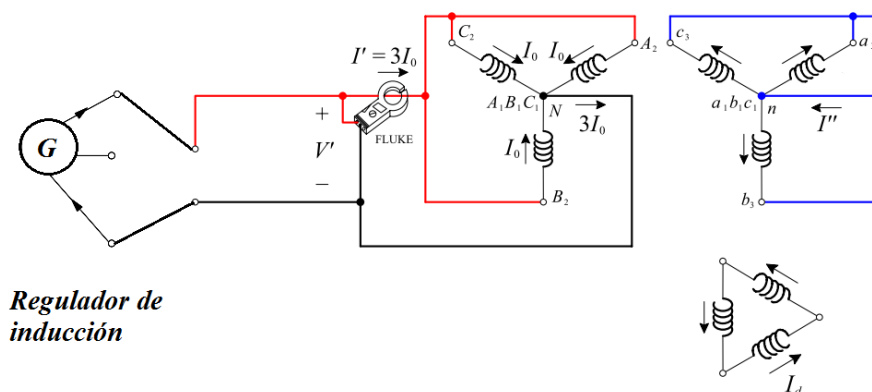


Figura 4: Conexión YNynD11.

Luego supondremos que el transformador está aterrado en el primario pero no lo está en el secundario. Diagrama indicado en la Figura 5.

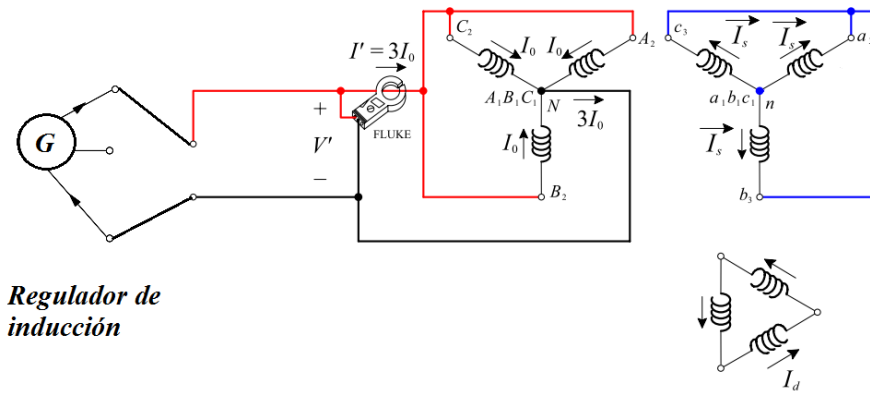


Figura 5: Conexión YNyD11.

Luego abriremos el triángulo, con lo cual el primario estará aterrado, el secundario no estará aterrado y el terciario tiene el triángulo abierto. Diagrama indicado en la Figura 6.

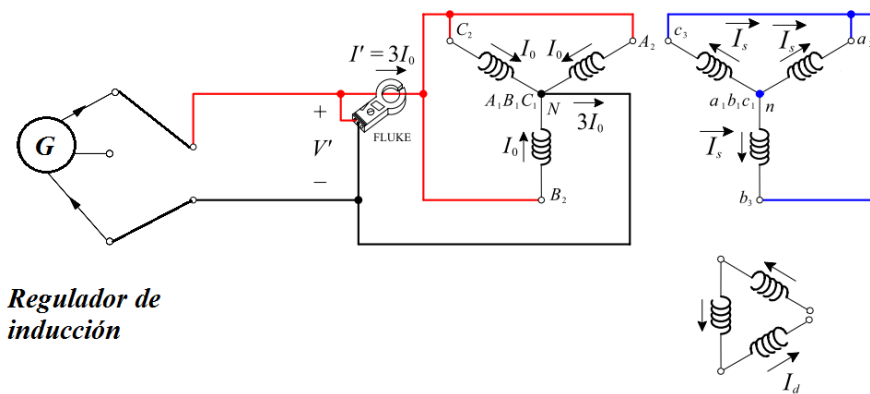


Figura 6: Conexión YNy11.

Por último se dejará el triángulo abierto, se aterrá el primario y el secundario. Diagrama indicado en la Figura 7.

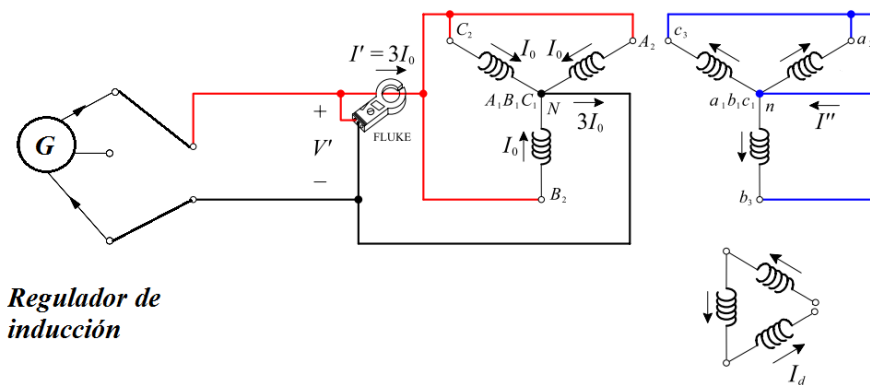


Figura 7: Conexión YNyn.



En cada uno de los casos se deberán relevar todas las corrientes, tensiones y desfase entre ambas, necesarias para calcular las impedancia vista.

#### 4.1.9. Ensayos de vacío en secuencia cero

Igual que en el punto anterior se busca observar el comportamiento de la impedancia magnetizante del transformador al estar alimentado con una fuente de secuencia cero en función del conexionado del mismo. Los conexionados a analizar son los indicados en las Figuras 8 y 9.

En todos los casos se deberán relevar las corrientes, tensiones y desfases necesarios para calcular las impedancia vista desde el primario del transformador.

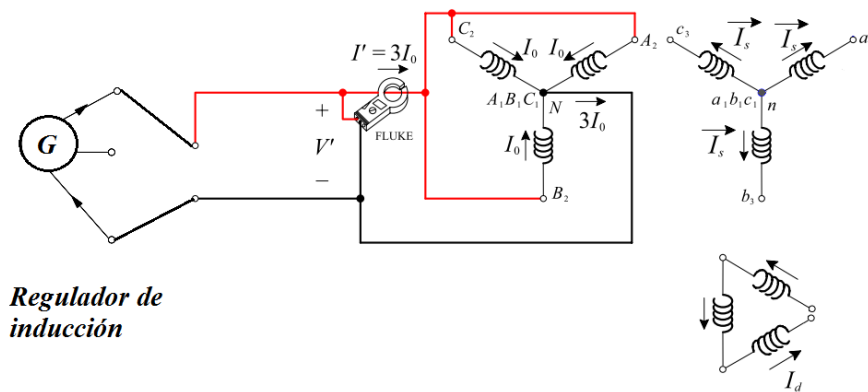


Figura 8: Conexión YNy.

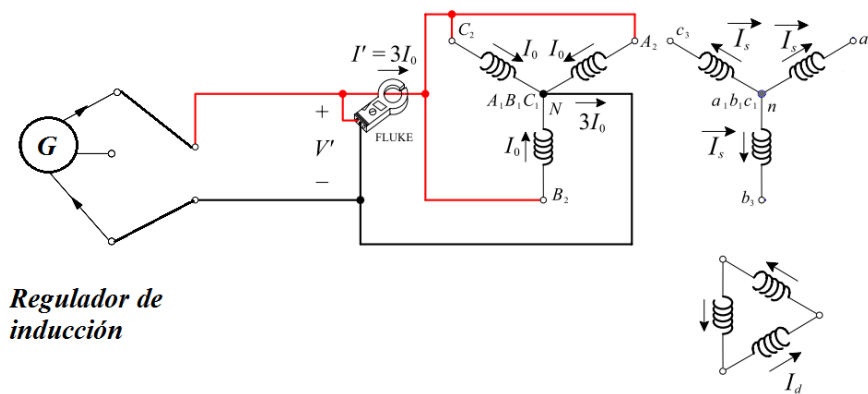


Figura 9: Conexión YNyD11.

#### 4.2. Conexión Zig-Zag

En este punto se ensayará el transformador con dos de sus bobinados conectados en zig-zag y con su neutro aterrado, para esto se utilizarán los dos bobinados que poseen igual número de vueltas, dejando el tercer bobinado abierto.

El ensayo consistirá en alimentar este transformador con una tensión de secuencia positiva y luego con una tensión cero, calculando en ambos caso la impedancia vista desde el primario. Por precaución se deberá comenzar el ensayo aplicando una tensión reducida. El conexionado a utilizar será el que se ilustra en la Figura 10.

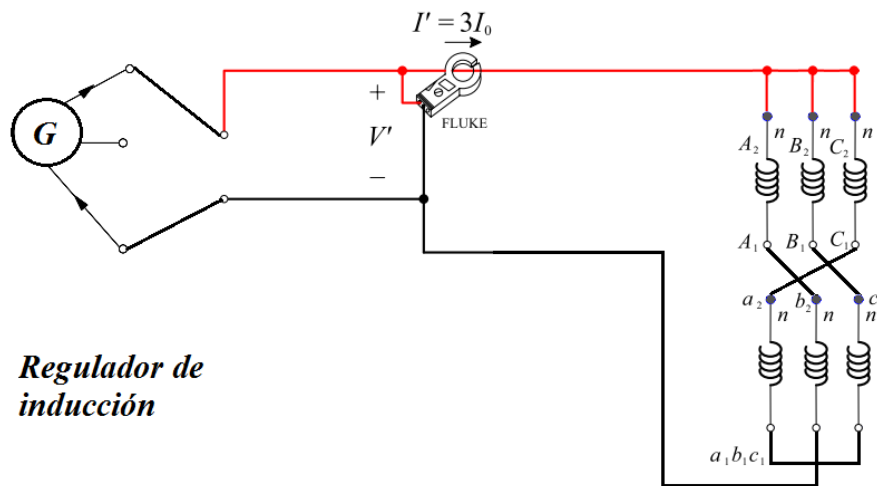


Figura 10: Conexión ZZ.

## 5. Documentación a entregar

El preinforme y el informe deberán contener la información que se solicita, la cual deberá ser presentada de acuerdo a la estructura que se detalla a continuación.

### 5.1. Preinforme

El preinforme deberá contener los siguientes análisis:

- Explicar brevemente en qué consiste la teoría de las redes de secuencia.
- Describir brevemente los distintos tipos de transformadores trifásicos según su tipo de núcleo.
- Explicar cualitativamente la relación entre el tipo de núcleo utilizado para construir el transformador y su comportamiento frente a una fuente de secuencia cero para los siguientes núcleos: núcleo plano 3 columnas, núcleo plano 4 columnas, núcleo plano 5 columnas y núcleo acorazado. Analizar que pasa en el caso de un banco trifásico de transformadores.
- Describir los modelos de régimen permanente en redes de secuencia para los siguientes tipos de conexiones: YY, YD, DD, DY, ZZ e YYD. Se deberá indicar que representa cada parámetro del modelo, tanto para secuencia positiva como para secuencia cero.
- Describir como puede utilizarse un transformador de potencia para la eliminación de corrientes armónicas, justificando claramente sus afirmaciones.
- Analizar el efecto de agregar un tercer bobinado en triángulo en un transformador estrella-estrella, particularmente el efecto sobre las tensiones y corrientes con el transformador en vacío.
- Describir brevemente como debe realizarse cada uno de los ensayos solicitados, según lo establecido en la norma IEEE Std C57.12.91-2001.
- Elaborar los esquemas de conexión trifilares para cada ensayo y para cada una de las conexiones a analizar. Donde figuren los rangos de operación de los instrumentos a utilizar y los elementos de comando y/o protección que se utilizarán.
- Elaborar tablas o planillas para cada ensayo, donde figuren claramente los datos a relevar. Las mismas deberán ser llevadas a la práctica y se utilizarán para documentar de forma ordenada los resultados obtenidos.

## 5.2. Informe

El informe deberá estar organizado de forma tal que los resultados y el análisis inicial de los mismos esté organizado por ensayo. El informe de la práctica deberá contener la siguiente información:

- Describir los ensayos realizados, listar y comentar los resultados obtenidos.
- Graficar la curva de vacío del transformador.
- Con los ensayos realizados se deberán calcular los parámetros del modelo del transformador trifásico (conexión YNynD11) en su versión monofásica estrella equivalente, para las tres redes de secuencia. Se tomará una temperatura de referencia de 75 °C para el cálculo de los parámetros. Todos los parámetros deben ser referidos al lado primario.
- Realizar el circuito estrella equivalente para la red de secuencia cero en cada uno de los ensayos descritos en el punto 4.1.8, justificando el porqué de los mismos. Todos los parámetros deben ser referidos al lado primario.
- Analizar los resultados numéricos obtenidos en el punto 4.1.8, indicar en cada ensayo como es el modelo de secuencia cero del conexionado ensayado y explicar la relación entre las impedancias calculadas en cada ensayo. ¿Los resultados son los esperados? Justificar en cada caso, si alguno de los resultados no fuese el esperado explicar a que se pueden deber las diferencias.
- Explicar si los valores de impedancia vista calculados en base a los resultados del ensayo descrito en el punto 4.2 son coherentes con los valores de impedancias relevados en los demás ensayos.