



Universidad de Chile
Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas
Departamento de Ingeniería Eléctrica
EL56A-3 - Laboratorio de Conversión
Electromecánica de la Energía
Profesor: Lorenzo Reyes C.

Informe de Laboratorio:
Transformadores monofásicos

Pablo A. Tapia Ugarte
9 de agosto de 2012

Índice general

| | |
|---|----------|
| 1. Antecedentes | 3 |
| 1.1. Introducción | 3 |
| 1.2. Objetivos | 4 |
| 1.3. Marco teórico | 4 |
| 1.3.1. Polaridad | 7 |
| 1.3.2. Aislación del transformador | 8 |
| 1.3.3. Regulación | 8 |
| 1.3.4. Eficiencia | 8 |
| 1.3.5. Componentes armónicas | 8 |
| 2. Desarrollo experimental | 9 |
| 2.1. Máquinas e instrumentos utilizados | 9 |
| 2.2. Actividad Uno | 10 |
| 2.2.1. Objetivos de la prueba | 10 |
| 2.2.2. Circuito experimental | 10 |
| 2.2.3. Resultados de la prueba | 11 |
| 2.3. Actividad Dos | 12 |
| 2.3.1. Objetivos de la prueba | 12 |
| 2.3.2. Circuito experimental | 12 |
| 2.3.3. Condiciones de la prueba | 12 |
| 2.3.4. Resultados de la prueba | 12 |
| 2.4. Actividad Tres | 13 |
| 2.4.1. Objetivos de la prueba | 13 |
| 2.4.2. Circuito experimental | 13 |
| 2.4.3. Condiciones de la prueba | 14 |
| 2.4.4. Resultados de la prueba | 14 |
| 2.5. Actividad Cuatro | 14 |
| 2.5.1. Objetivos de la prueba | 14 |
| 2.5.2. Circuito experimental | 15 |
| 2.5.3. Condiciones de la prueba | 15 |
| 2.5.4. Resultados de la prueba | 16 |
| 2.6. Actividad Cinco | 16 |
| 2.6.1. Objetivos de la prueba | 16 |
| 2.6.2. Circuito experimental | 17 |
| 2.6.3. Condiciones de la prueba | 18 |

| | |
|--|-----------|
| 2.6.4. Resultados de la prueba | 18 |
| 2.7. Actividad Seis | 18 |
| 2.7.1. Objetivos de la prueba | 18 |
| 2.7.2. Circuito experimental | 19 |
| 2.7.3. Condiciones de la prueba | 20 |
| 2.7.4. Resultados de la prueba | 20 |
| 2.8. Actividad Siete | 21 |
| 2.8.1. Objetivos de la prueba | 21 |
| 2.8.2. Circuito experimental | 21 |
| 2.8.3. Condiciones de la prueba | 22 |
| 2.8.4. Resultados de la prueba | 22 |
| 3. Análisis de resultados | 25 |
| 3.1. Actividad Uno | 25 |
| 3.1.1. Discusión | 25 |
| 3.2. Actividad Dos | 25 |
| 3.2.1. Comparación de resultados con valores típicos | 25 |
| 3.2.2. Discusión | 25 |
| 3.3. Actividad Tres | 25 |
| 3.3.1. Comparación de resultados con valores típicos | 25 |
| 3.3.2. Discusión | 26 |
| 3.4. Actividad Cuatro | 26 |
| 3.4.1. Comparación de resultados con valores típicos | 26 |
| 3.4.2. Discusión | 26 |
| 3.5. Actividad Cinco | 26 |
| 3.5.1. Comentarios de los resultados | 26 |
| 3.5.2. Discusión | 27 |
| 3.6. Actividad Seis | 27 |
| 3.6.1. Comparación de resultados con valores típicos | 27 |
| 3.7. Actividad Siete | 27 |
| 3.7.1. Discusión | 27 |
| 4. Conclusiones | 28 |
| 4.1. Conclusiones generales | 28 |
| 4.2. Comentarios sobre la experiencia | 29 |

Capítulo 1

Antecedentes

1.1. Introducción

El transformador es, en su definición más general, un dispositivo electromagnético empleado para transferir energía eléctrica entre circuitos de corriente alterna. Esta transferencia va acompañada habitualmente, aunque no siempre, de una variación en el nivel de tensión. Esta característica lo hace indispensable en aplicaciones de transmisión y distribución de energía eléctrica en corriente alterna donde es necesario un alto nivel de voltaje para transmitir la energía a grandes distancias con pocas pérdidas. En la experiencia de laboratorio, se trabajará con un transformador monofásico de tres enrolls, constituido por dos bobinas de $110[V]$, $4,6[A]$ y una bobina de $110[V]$, $9,1[A]$ con lo cual puede obtenerse un transformador de $220/110[V]$, o bien, uno de $110/110[V]$; ambos con potencia nominal de $1[KW]$. El desarrollo de la experiencia considera efectuar mediciones de variables físicas e identificar partes constitutivas del transformador que son esenciales para la determinación de aquellos parámetros que permiten entender, modelar y caracterizar su comportamiento. Es así como, en una primera etapa, se identificarán los bornes de las bobinas cuya designación estandarizada da cuenta de la polaridad que genera la inducción electromagnética en el secundario respecto a la tensión de alimentación primaria. Además, basándose en los datos de placa del transformador, se determinarán las magnitudes de corriente y tensión para las diferentes conexiones que pueden darse en las bobinas. Posteriormente, mediante una serie de ensayos eléctricos, se determinará la resistencia de aislación existente entre enrollados y entre cada uno de los enrollados y el núcleo del transformador; los parámetros de la rama de magnetización del circuito equivalente; su impedancia de cortocircuito; su comportamiento expresado en los conceptos de rendimiento y regulación mediante pruebas con carga. Además, se observará las formas de onda de la corriente de excitación y de la tensión inducida en vacío. De igual forma, se hará un análisis de armónicas de estas magnitudes analizando el efecto que produce la variación de la tensión de entrada.

1.2. Objetivos

- Adquirir conocimiento sobre las características y elementos constitutivos de un transformador, como por ejemplo, de las designaciones normalizadas referentes a los datos de placa y bornes, así como de aquellas características de diseño referentes al núcleo y enrollados.
- Determinación de parámetros que permiten caracterizar el circuito equivalente de un transformador.
- Estudio de las componentes armónicas, que permitan comprender el efecto magnético inducido por el hierro del transformador.
- Familiarización con instrumentos y maquinaria de uso extensivo en ingeniería eléctrica.
- Comparar valores obtenidos para la resistencia de aislación con valores típicos de equipos en buen estado.
- Verificación de la teoría que permite modelar y predecir el comportamiento de transformadores.

1.3. Marco teórico

Los transformadores son básicamente, circuitos magnéticos de dos bobinas que convierten energía eléctrica de un nivel de voltaje y corriente a otro nivel de voltaje y corriente diferente, gracias al distinto número de vueltas de cada uno de los enrollados y al flujo común, variable en el tiempo, que ambos enlazan. En el caso más simple, un transformador monofásico es un dispositivo de dos enrollados, uno de los cuales (enrollado primario) se conecta a una fuente de alimentación variable en el tiempo. Esto origina un flujo magnético también variable en el tiempo, que es enlazado por el segundo enrollado (enrollado secundario), induciéndose en este un voltaje que puede alimentar un consumo determinado.

Las pérdidas ocurridas en transformadores reales deben necesariamente considerarse si se quiere obtener un modelo confiable de su comportamiento. El consumo de potencia activa y reactiva por parte del transformador puede explicarse por: Pérdidas por efecto Joule, histéresis, corrientes de Foucault y flujos de dispersión que salen del núcleo.

Considerando lo anterior el transformador puede modelarse aproximadamente por:

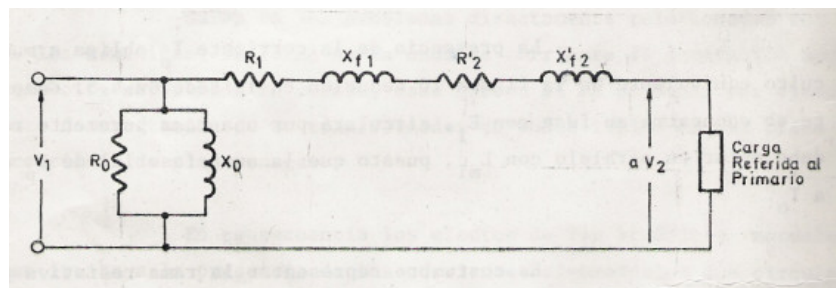


Figura 1.1: Circuito equivalente aproximado del transformador monofásico.

Para determinar estos parámetros es necesario realizar 2 pruebas:

- Prueba de circuito abierto. Esta prueba permite calcular los parámetros de la rama 'shunt', correspondientes a las pérdidas por histéresis y por los flujos de dispersión que salen del núcleo

de fierro. Se alimenta con tensión nominal el lado de baja tensión(BT) y se deja abierto el lado de alta tensión(AT). Se mide la corriente entregada por la fuente I_0 , tensión nominal en BT V_1 y potencia suministrada por la fuente P_0 .

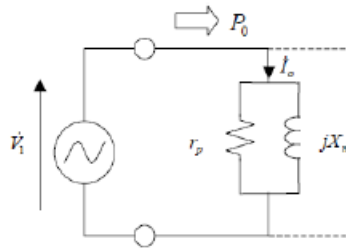


Figura 1.2: Equivalente para la prueba de circuito abierto.

Con estas medidas es posible calcular los parámetros de la siguiente forma:

$$R_0 = r_p = r_{fe} = \frac{V_1^2}{P_0} \quad (1.1)$$

$$X_0 = X_m = x_{fe} = \frac{V_1^2}{\sqrt{(V_1 \cdot I_0)^2 - P_0^2}} \quad (1.2)$$

- Prueba de corto circuito. Esta prueba permite calcular los parámetros de la rama ‘serie’, correspondientes a las pérdidas por efecto Joule y por las corrientes de Foucault. Se alimenta con tensión reducida el lado de alta tensión(AT) hasta obtener corriente nominal y se cortocircuita el lado de baja tensión(BT). Se mide la corriente nominal I_0 , tensión reducida en AT V_1 y potencia suministrada por la fuente P_0 .

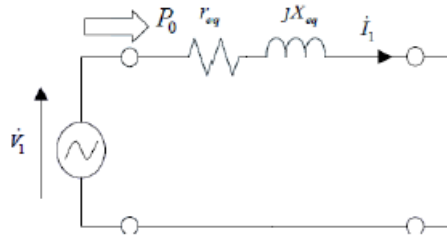


Figura 1.3: Equivalente para la prueba de corto circuito.

Es importante mencionar que, como se puede apreciar en la Fig. 1.3, la corriente que circula por la rama shunt es despreciable por lo que se considera que la corriente nominal I_1 fluye en su totalidad por el elemento serie. Con los datos obtenidos es posible calcular los parámetros de la siguiente forma:

$$r_{eq} = \frac{P_0}{I_1^2} \quad (1.3)$$

$$x_{eq} = \frac{\sqrt{(V_1 \cdot I_1)^2 - P_0^2}}{I_1^2} \quad (1.4)$$

además,

$$r_{eq} = r_1 + r'_2 = r_1 + a^2 \cdot r_2 \quad (1.5)$$

$$x_{eq} = x_1 + x'_2 = x_1 + a^2 \cdot x_2 \quad (1.6)$$

Pueden considerarse además las aproximaciones $r_1 = r'_2$ y $x_1 = x'_2$, para obtener de manera sencilla una muy buena aproximación para r_1, r_2, x_1 , y x_2 .

1.3.1. Polaridad

En la mayoría de los casos en que se trabaja con transformadores monofásicos se presenta la necesidad de conectar dichos equipos ya sea en paralelo o formando bancos trifásicos. Ante esto, es necesario tener precaución con las polaridades respectivas. Según la norma ASA (American Standard Association) los terminales de alta tensión serán designados por las letras H_1 y H_2 y los de baja tensión por X_1 y X_2 . Se dice que H_1 y X_1 tienen igual polaridad si el terminal H_1 está a potencial positivo con respecto a H_2 y X_1 está a potencial positivo con respecto a X_2 . Si H_1 está adyacente a X_1 , se habla de “polaridad sustractiva”, si por el contrario dicho terminal está adyacente a X_2 , se habla de “polaridad aditiva” tal como se muestra en la Fig. 1.4.

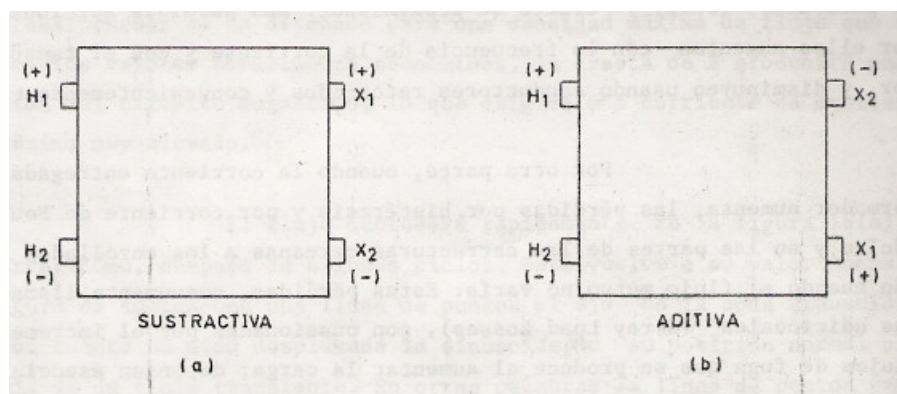


Figura 1.4: Tipos de polaridad externa.

Prueba de polaridad

Para medir la polaridad de los enrollados puede utilizarse el método de corriente continua. Este método consiste en utilizar una pila y un voltímetro de corriente continua, para determinar la polaridad del transformador viendo la deflexión de la aguja del voltímetro. En otras palabras, una vez conectada la pila en AT se producirá un flujo transiente que inducirá en el enrollado de BT un voltaje transiente. Si se supone al transformador con una polaridad sustractiva por ejemplo, y se conecta el voltímetro de tal forma que su terminal positivo coincida con X_1 y el negativo con X_2 , la aguja debiese deflectar en sentido positivo.

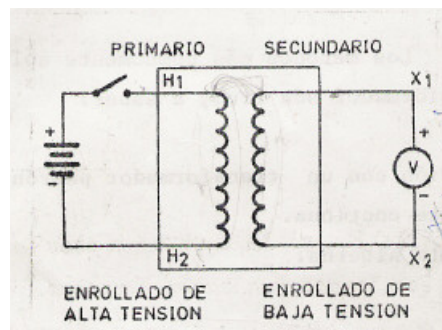


Figura 1.5: Método de corriente continua para determinar la polaridad.

1.3.2. Aislación del transformador

La aislación entre los bobinados y el núcleo del transformador, es muy importante en materia de seguridad al utilizar estos equipos. Para medir la resistencia de aislación en un transformador, se utiliza un megohmetro (también conocido como megger, nombre que hace referencia a la marca del primer medidor portátil de aislamiento introducido en la industria eléctrica), instrumento que basa su funcionamiento en la generación temporal de un sobrevoltaje el cual se aplica al sistema hasta que se rompe su aislamiento, al establecerse un arco eléctrico.

1.3.3. Regulación

La regulación de un transformador de tensión constante se define como la variación de la tensión en el secundario, expresada en tanto por ciento de la tensión nominal del mismo, que se produce al variar la carga entre los kVA nominales y cero, con determinado factor de potencia y manteniéndose constante la tensión aplicada al primario. Conociendo la resistencia y la reactancia equivalentes del transformador, es posible determinar la regulación, ya que la caída de tensión por impedancia en vacío es despreciable, la tensión del secundario en vacío es V_1/a , luego la regulación puede calcularse como:

$$Reg. [\%] = \frac{V_1/a - V_2}{V_2} \cdot 100 \quad (1.7)$$

1.3.4. Eficiencia

La eficiencia del transformador puede calcularse como la relación entre las potencias de salida y entrada, por lo tanto su valor se puede obtener midiendo simultáneamente ambas potencias o, como es usual en transformadores de grandes potencias, se pueden determinar directamente las pérdidas de potencia para evaluar así la eficiencia.

$$\eta = \frac{P_{salida}}{P_{entrada}} = \frac{P_{salida}}{P_{salida} + perdidas} \quad (1.8)$$

1.3.5. Componentes armónicas

Los armónicos son distorsiones de las ondas sinusoidales de tensión y/o corriente de los sistemas eléctricos, debido al uso de cargas con impedancia no lineal. Existen varios grados de distorsión armónica. En general, la distorsión armónica de orden n es la relación entre la amplitud rms de la frecuencia de la n -ésima armónica y la amplitud rms de la frecuencia fundamental. La distorsión armónica total es la amplitud rms combinada de las armónicas superiores, dividida por la amplitud rms de la fundamental. La ecuación para el cálculo de la distorsión armónica total o THD (total harmonic distortion) es:

$$THD [\%] = \frac{(\sum_{k=2}^n V_{k\ rms}^2)^{1/2}}{V_{f\ rms}} \quad (1.9)$$

Capítulo 2

Desarrollo experimental

2.1. Máquinas e instrumentos utilizados

A continuación se detallan todos los instrumentos utilizados en el trabajo de laboratorio.

- Transformador monofásico de tres enrollados, Fig.2.1a
- Autotransformador regulable “Variac”, Fig.2.1b
- Fuente de 220[V] AC, Fig.2.1c
- Carga resistiva variable, Fig.2.1d. Elemento con varias cargas resistivas de distinto tamaño que pueden ser conectadas en paralelo mediante el accionamiento de un switch que posee cada una de las distintas resistencias dentro del elemento.
- Carga inductiva variable, Fig.2.1e. Elemento que permite el cambio del valor de la inductancia de la carga mediante el movimiento de una palanca giratoria.
- Cargas capacitivas, Fig.2.1f. Elementos singulares con capacidad determinada.
- Resistencia “Shunt” de bajo valor, Fig.2.1g. Resistencia especial usada para medir corriente con el osciloscopio.
- Pila o fuente DC de 9[V], Fig.2.1h.
- Óhmetro analógico, Fig.2.1i.
- Multímetro digital con tenaza, Fig.2.1j. Elemento marca Hioki que permite medir tensión, corriente y potencia de manera simultánea.
- Megóhmetro, Fig.2.1k. Elemento que permite medir las resistencias de aislación.
- Osciloscopio, Fig.2.1l. Permite observar y medir las formas de onda de corriente y voltaje.
- Analizador de armónicas, Fig.2.1m. Elemento que permite observar y medir las componentes armónicas del voltaje y de la corriente.

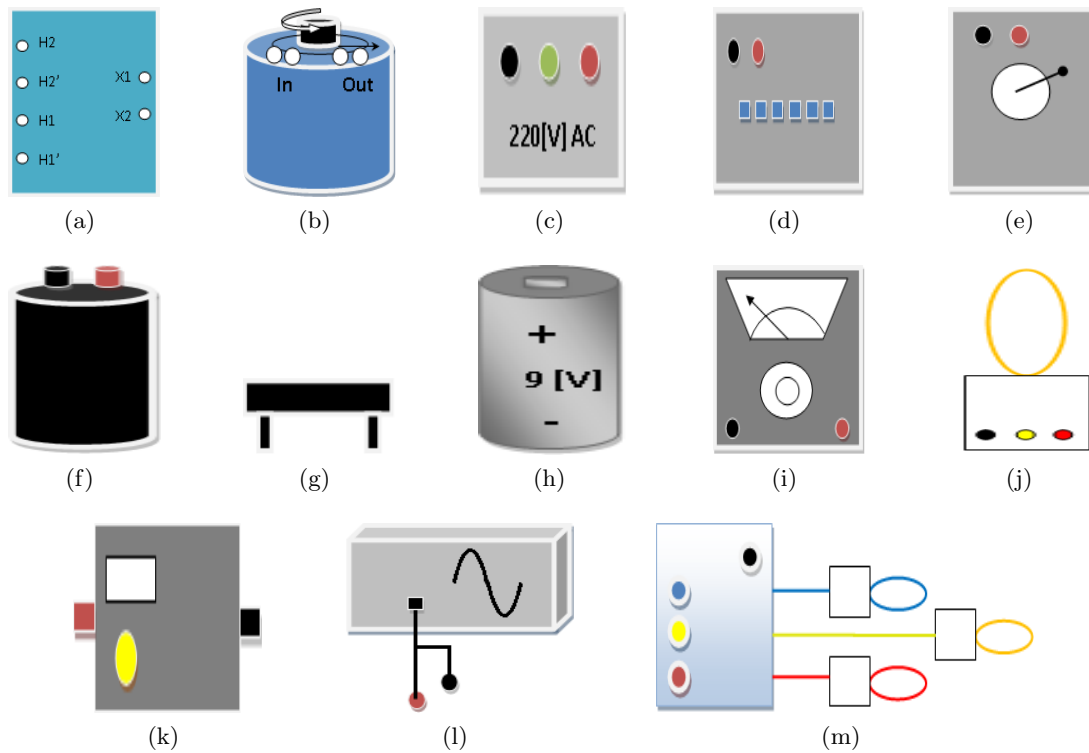


Figura 2.1: Dibujo de cada uno de los elementos utilizados en los diagramas de conexión, de todas las actividades del trabajo de laboratorio

2.2. Actividad Uno

2.2.1. Objetivos de la prueba

- Determinar potencia, magnitudes de corriente y tensión del transformador monofásico, en sus valores nominales, para las configuraciones: 220/110[V] y 110[V]/110[V].

2.2.2. Circuito experimental

- Conexión 220/110[V]

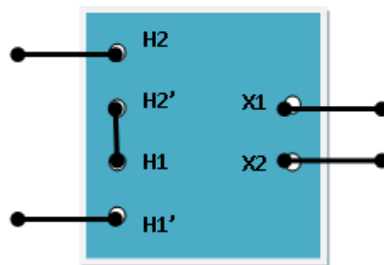


Figura 2.2: Configuración 220/110[V] para transformados monofásico de 3 enrollados

■ Conexión 110/110[V]

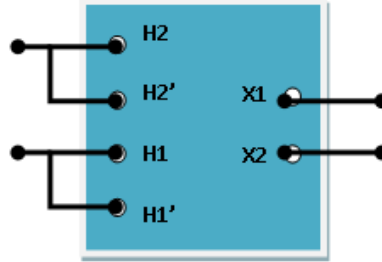


Figura 2.3: Configuración 110/110[V] para transformados monofásico de 3 enrollados

2.2.3. Resultados de la prueba

Para el cálculo de las magnitudes en p.u. se utilizará: $S_{base} = 1[kVA]$ y $V_{base} = 110[V]$ o $V_{base} = 220[V]$ según corresponda. De la placa del transformador se obtuvo que la potencia del transformador es de $1[kVA]$ y también los siguientes valores:

| | Voltaje nom.[V] | Corriente nom.[A] |
|-------|-----------------|-------------------|
| Prim. | 110 | 4,6 |
| Sec. | 110 | 9,1 |

Tabla 2.1: Valores en magnitud real

Con estos resultados es posible afirmar que la magnitud de corriente y tensión de las distintas conexiones, son las siguientes:

- Conexión 220/110[V]
 - primario: $V_{nom} = 1[p.u.]$, $e Inom = 1,01[p.u.]$
 - secundario: $V_{nom} = 1[p.u.]$, $e Inom = 1[p.u.]$
- Conexión 110/110[V]
 - primario: $V_{nom} = 1[p.u.]$, $e Inom = 1,01[p.u.]$
 - secundario: $V_{nom} = 1[p.u.]$, $e Inom = 1[p.u.]$

2.3. Actividad Dos

2.3.1. Objetivos de la prueba

- Determinar la polaridad de los enrollados del transformador monofásico.
- Utilizar y comprobar eficacia del método de corriente continua para medir la polaridad.

2.3.2. Circuito experimental

Para esta prueba se utilizó de base el siguiente diagrama circuital:

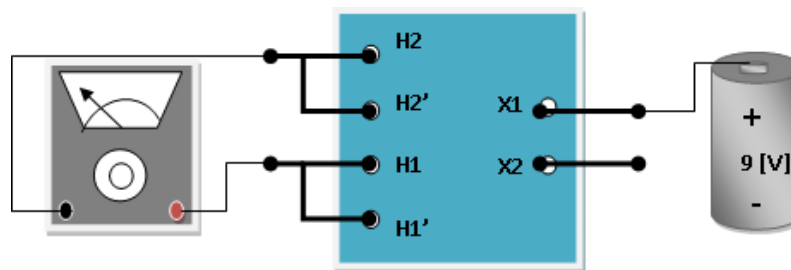


Figura 2.4: Diagrama de conexión para la medida de polaridad

2.3.3. Condiciones de la prueba

- No debe cerrarse el circuito antes de realizar la prueba, es por eso que el extremo negativo de la fuente DC se dibuja desconectado en la Fig. 2.4.
- La prueba consiste en conectar y desconectar inmediatamente el extremo negativo de la fuente al circuito, simultáneamente observar lo que sucede con la aguja del *óhmetro*.
- Es importante tener en cuenta que se deben respetar las polaridades de todos los elementos involucrados para obtener un resultado correcto.

2.3.4. Resultados de la prueba

La aguja del *óhmetro* se mueve rápidamente, aunque muy poco, hacia la derecha (valores positivos) y luego se devuelve a cero. En consecuencia la polaridad de los enrollados del transformador es sustractiva.

2.4. Actividad Tres

2.4.1. Objetivos de la prueba

- Medir la resistencia de aislación entre los enrollados primario y secundario, así como la de estos últimos con el núcleo del transformador.
- Aprender a utilizar correctamente un megóhmetro, instrumento especialmente diseñado para medir resistencias de aislamiento.

2.4.2. Circuito experimental

Para esta prueba se debe medir la resistencia de aislación entre los enrollados y el núcleo. Para esto se realizan las siguientes conexiones:

- Conexión para medir la resistencia de aislación entre secundario X y primario H' Fig.2.5a:
- Conexión para medir la resistencia de aislación entre secundario X y primario H Fig.2.5b:
- Conexión para medir la resistencia de aislación entre secundario X y el núcleo Fig.2.5c:
- Conexión para medir la resistencia de aislación entre primario H y primario H' Fig.2.5d:
- Conexión para medir la resistencia de aislación entre primario H'y núcleo Fig.2.5e:
- Conexión para medir la resistencia de aislación entre primario H y núcleo Fig.2.5f:

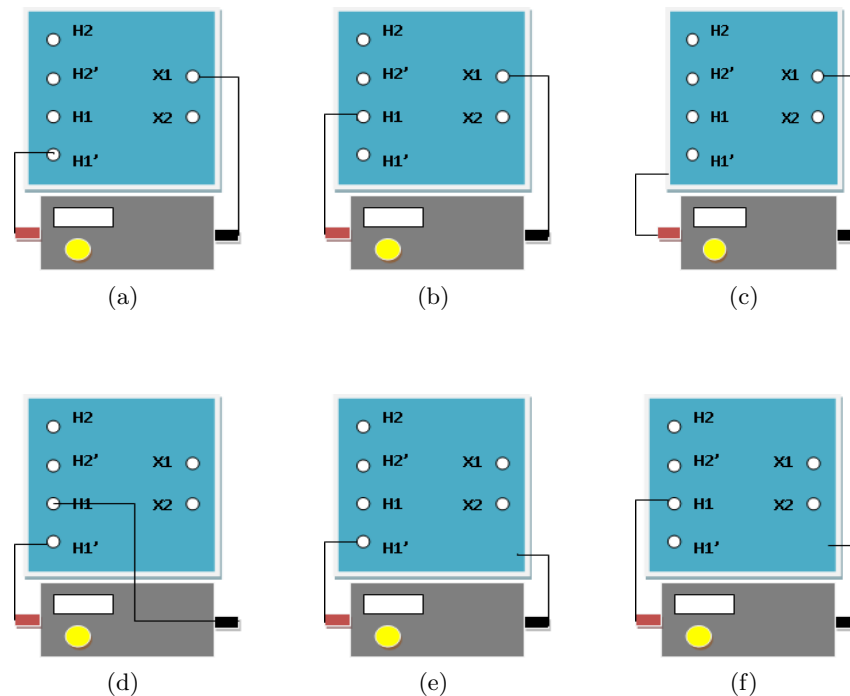


Figura 2.5: Diagrama de conexión para la medida de aislacion entre secundario X y primario H'

2.4.3. Condiciones de la prueba

- Es importante no tocar las puntas de prueba, para evitar una descarga de alto voltaje.
- Las puntas del megóhmetro deben ser conectadas a los terminales positivos de cada bobina.
- En el caso de medir la resistencia con respecto al núcleo, se utilizará una de las tenasas del megóhmetro para conectarla a la carcasa del transformador mientras la otra punta se conecta a la bobina con la cual se quiere obtener la resistencia de aislación.

2.4.4. Resultados de la prueba

Los resultados de la prueba corresponden a la medida de la resistencia de aislación (en Mega Omhs, $[M\Omega]$) entre las distintas partes del transformador monofásico.

| | Primario H | Primario H' | Secundario X | Núcleo |
|--------------|--------------------|--------------------|--------------|--------------------|
| Primario H | | 24, 15 $[M\Omega]$ | Off | 35, 98 $[M\Omega]$ |
| Primario H' | 24, 15 $[M\Omega]$ | | Off | 73, 6 $[M\Omega]$ |
| Secundario X | Off | Off | | Off |
| Núcleo | 35, 98 $[M\Omega]$ | 73, 6 $[M\Omega]$ | Off | |

Tabla 2.2: Valores de resistencia de aislación en magnitud real

| | Primario H | Primario H' | Secundario X | Núcleo |
|--------------|-----------------|-----------------|--------------|-----------------|
| Primario H | | 0,499 $[Mp.u.]$ | Off | 0,743 $[Mp.u.]$ |
| Primario H' | 0,499 $[Mp.u.]$ | | Off | 1,52 $[Mp.u.]$ |
| Secundario X | Off | Off | | Off |
| Núcleo | 0,743 $[Mp.u.]$ | 1,52 $[Mp.u.]$ | Off | |

Tabla 2.3: Valores de resistencia de aislación en por unidad

2.5. Actividad Cuatro

2.5.1. Objetivos de la prueba

- Realizar la prueba de circuito abierto para el transformador monofásico.
- Tomar las mediciones necesarias que permitan calcular los parámetros de la rama de magnetización del circuito teórico equivalente.
- Realizar la prueba utilizando sólo los instrumentos disponibles en el laboratorio.
- Tomar precaución de las conexiones y elementos que puedan provocar un accidente.
- Familiarizarse con elementos de uso extensivo en el área de la ingeniería eléctrica.

2.5.2. Circuito experimental

Para realizar esta prueba se utilizó el siguiente diagrama circuital:

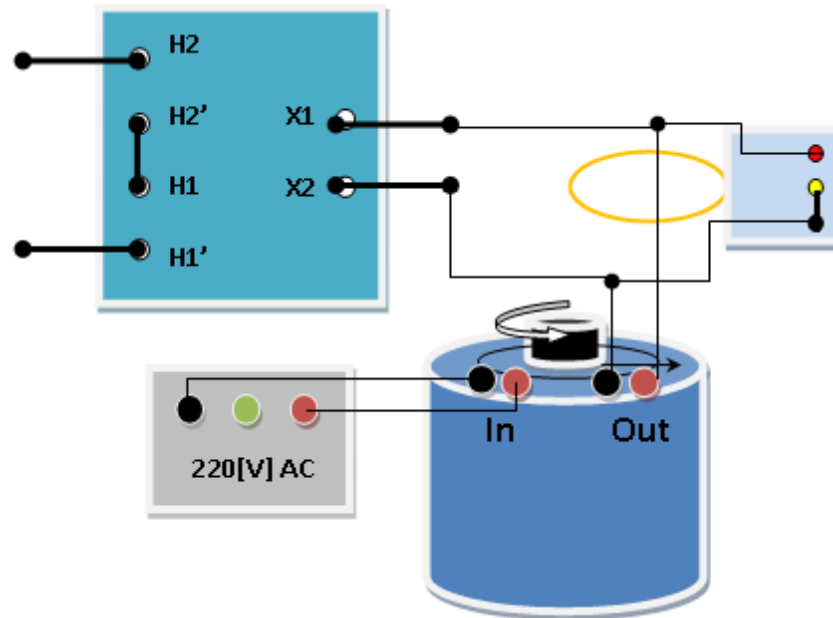


Figura 2.6: Diagrama de conexión para la prueba de circuito abierto

Los elementos utilizados en esta prueba corresponden a:

- Fuente de 220[V] AC.
- Autotransformador regulable “Variac”.
- Transformador monofásico de tres enrollados.
- Multímetro digital con tenaza, Hioki.
- Cables y tenazas.

2.5.3. Condiciones de la prueba

Para esta prueba es importante considerar que:

- El transformador se ha dispuesto en su configuración 220/110[V].
- Se alimentara con tensión nominal el lado de Baja Tensión (110[V]) y se dejará abierto el lado de Alta tensión.
- Debido a que no se cuenta con una fuente de 110[V] AC se utiliza el autotransformador para modificar la tensión de entrada 220[V] AC a la tensión deseada.
- El multímetro digital Hioki, permite la medición de corriente, tensión y potencia de forma simultanea, por lo que no es necesario conectar otros multímetros para tomar las medidas requeridas.

2.5.4. Resultados de la prueba

Se presentan a continuación los resultados de la prueba de circuito abierto:

| | Valores reales | Valores en p.u. |
|---------------------------|----------------|-----------------|
| Voltaje nominal BT | 110[V] | 1[p.u.] |
| Potencia real entregada | 11[W] | 0,011[p.u.] |
| Corriente desde la fuente | 1,05[A] | 0,115[p.u.] |

Tabla 2.4: Resultados prueba de circuito abierto, transformador monofásico.

Con estos datos es posible calcular los parámetros de la rama de magnetización, tal como se explica en la sección 1.3. Por consiguiente:

| | Valores reales | Valores en p.u. |
|----------|----------------|-----------------|
| R_{fe} | 1100[Ω] | 90,9[p.u.] |
| X_{fe} | 105,24[Ω] | 8,7[p.u.] |

Tabla 2.5: Valores rama de magnetización del circuito equivalente aproximado.

2.6. Actividad Cinco

2.6.1. Objetivos de la prueba

- Observar y dibujar la forma de onda de la tensión inducida en vacío y de la corriente de excitación.
- Observar y medir la magnitud de las componentes armónicas en la tensión inducida en vacío y en la corriente de excitación.
- Medir la distorsión armónica total (THD) en la tensión inducida en vacío y en la corriente de excitación.
- Medir el efecto en las componentes armónicas al variar la tensión nominal a un 150%.

2.6.2. Circuito experimental

Para esta actividad se utilizará básicamente la misma conexión de la prueba de circuito abierto, aunque con algunas modificaciones según corresponda.

- Conexión para la medición de la tensión inducida en vacío y para la medición de la corriente de excitación:

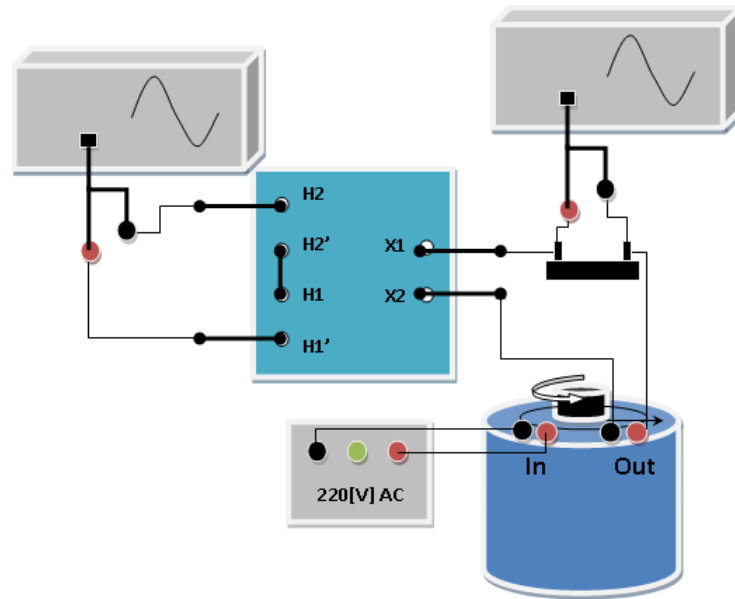


Figura 2.7: Diagrama de conexión para la medición de las formas de onda de tensión y corriente

- Conexión para la medición de las componentes armónicas de la tensión en vacío y de la corriente de excitación:

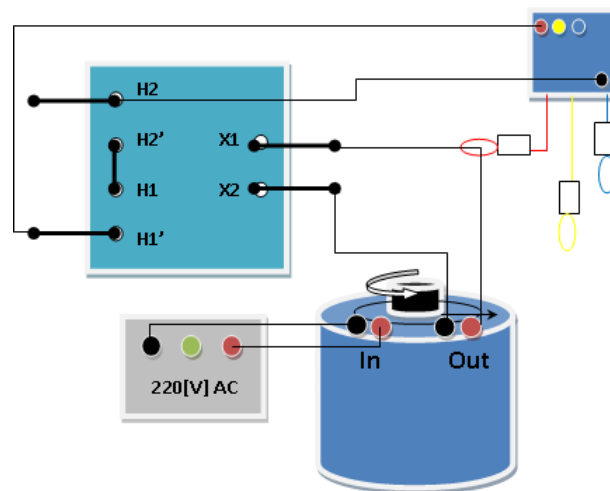


Figura 2.8: Diagrama de conexión para la medición de las componentes armónicas de tensión y corriente

2.6.3. Condiciones de la prueba

- La resistencia shunt que se utiliza para medir la forma de onda de la corriente con el osciloscopio debe ir en serie con el circuito.
- Los osciloscopios deben estar ‘levantados’ de tierra, para poder realizar las mediciones de manera correcta y segura.
- Las demás condiciones son las mismas que las de la prueba de circuito abierto mencionadas anteriormente.

2.6.4. Resultados de la prueba

- Forma de onda de la tensión inducida en vacío:

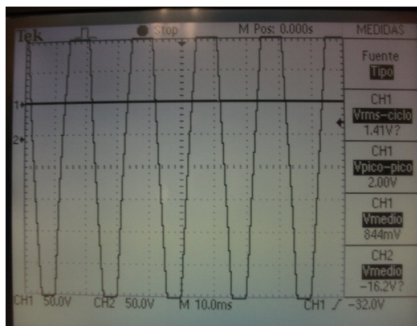


Figura 2.9: Forma de onda de la tensión inducida en vacío.

- Forma de onda de la corriente de excitación:

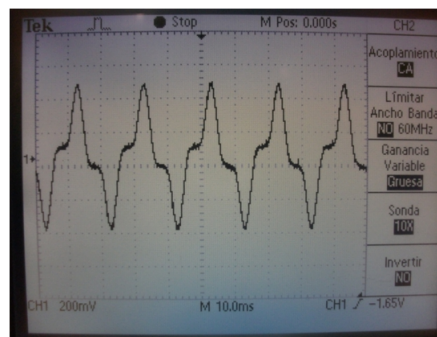


Figura 2.10: Forma de onda de la tensión inducida en vacío.

- Resultados de las componentes armónicas de la tensión inducida y de la corriente de excitación.

2.7. Actividad Seis

2.7.1. Objetivos de la prueba

- Realizar la prueba de corto circuito para el transformador monofásico.

| | Valor | 3 ^{ra} armónica[%] | 5 ^{ta} armónica[%] | THD[%] |
|------------------|----------|-----------------------------|-----------------------------|--------|
| Corriente exct. | 1,024[A] | 47,7 | 8,3 | 46,2 |
| Tensión en vacío | 211,4[V] | 2,1 | 2,9 | 3,7 |

Tabla 2.6: Valores de las componentes armónicas de la corriente de excitación y de la tensión en vacío.

| | Valor | 3 ^{ra} armónica[%] | 5 ^{ta} armónica[%] | THD[%] |
|------------------|----------|-----------------------------|-----------------------------|--------|
| Corriente exct. | 6,949[A] | 49,9 | 10,4 | 50,9 |
| Tensión en vacío | 315,4[V] | 6,4 | 3,7 | 7,5 |

Tabla 2.7: Valores de las componentes armónicas de la corriente de excitación y de la tensión en vacío a 150 % de su valor nominal.

- Tomar las mediciones necesarias que permitan calcular los parámetros de la rama serie del circuito equivalente aproximado.
- Realizar la prueba utilizando sólo los instrumentos disponibles en el laboratorio.
- Tomar precaución de las conexiones y elementos que puedan provocar un accidente.
- Familiarizarse con elementos de uso extensivo en el área de la ingeniería eléctrica.

2.7.2. Circuito experimental

Para realizar esta prueba se utilizó el siguiente diagrama circuital:

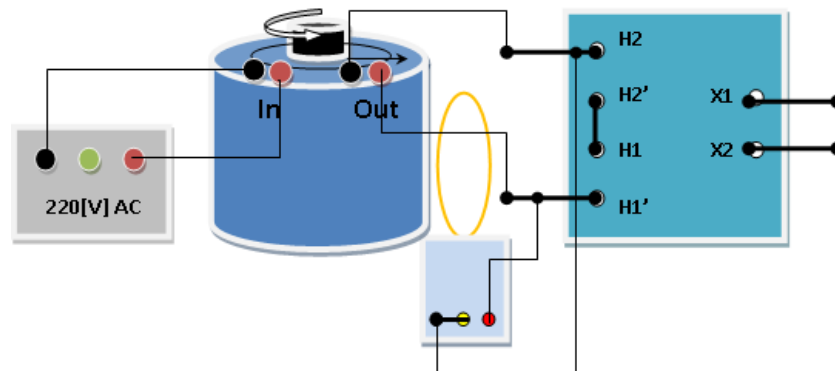


Figura 2.11: Diagrama de conexión para la prueba de corto circuito

Los elementos utilizados en esta prueba corresponden a:

- Fuente de 220[V] AC.
- Autotransformador regulable “Variac”.
- Transformador monofásico de tres enrollados.

- Multímetro digital con tenaza, Hioki.
- Cables y tenazas.

2.7.3. Condiciones de la prueba

Para esta prueba es importante considerar que:

- El transformador se ha dispuesto en su configuración 220/110[V].
- Se alimenta con tensión reducida el lado de alta tensión (220[V]) y se cortocircuita el lado de Alta tensión.
- Se utiliza el autotransformador para modificar la tensión de entrada y así obtener la tensión reducida para alimentar el lado de alta tensión.
- El multímetro digital Hioki, permite la medición de corriente, tensión y potencia de forma simultánea, por lo que no es necesario conectar otros multímetros para tomar las medidas requeridas.

2.7.4. Resultados de la prueba

Se presentan a continuación los resultados de la prueba de circuito abierto:

| | Valores reales | Valores en p.u. |
|-------------------------|----------------|-----------------|
| Voltaje reducido AT | 9,3[V] | 0,042[p.u.] |
| Potencia real entregada | 35[W] | 0,035[p.u.] |
| Corriente nominal | 4,6[A] | 1,01[p.u.] |

Tabla 2.8: Resultados prueba de corto circuito, transformador monofásico.

Con estos datos es posible calcular los parámetros de la rama serie, tal como se explica en la sección 1.3. Por consiguiente:

| | Valores reales | Valores en p.u. |
|------------------|----------------|-----------------|
| $R = r_1 + r'_2$ | 1,654[Ω] | 0,034[p.u.] |
| $X = x_1 + x'_2$ | 1,162[Ω] | 0,024[p.u.] |
| r_1 | 0,827[Ω] | 0,017[p.u.] |
| r_2 | 0,207[Ω] | 0,004[p.u.] |
| x_1 | 0,581[Ω] | 0,012[p.u.] |
| x_2 | 0,145[Ω] | 0,003[p.u.] |

Tabla 2.9: Valores rama serie del circuito equivalente aproximado.

2.8. Actividad Siete

2.8.1. Objetivos de la prueba

- Realizar medidas de corriente, tensión y potencia, para distintos valores y tipos de carga, en ambos lados del transformados monofásico.
- Utilizar los datos obtenidos para calcular la regulación y eficiencia del transformador, para distintas cargas.
- Conocer y experimentar con cargas del tipo resistivas, inductivas y capacitivas de electrónica de potencia.

2.8.2. Circuito experimental

- Para la prueba con carga resistiva se conectó de la siguiente forma:

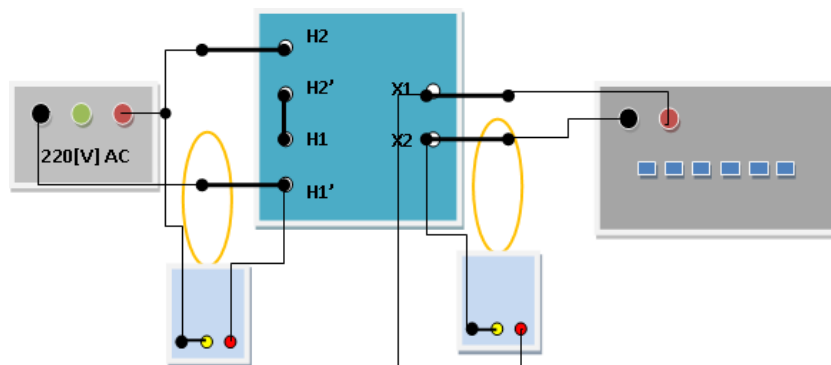


Figura 2.12: Diagrama de conexión para la prueba del transformador con carga resistiva

- Para la prueba con carga inductiva se conectó de la siguiente forma:

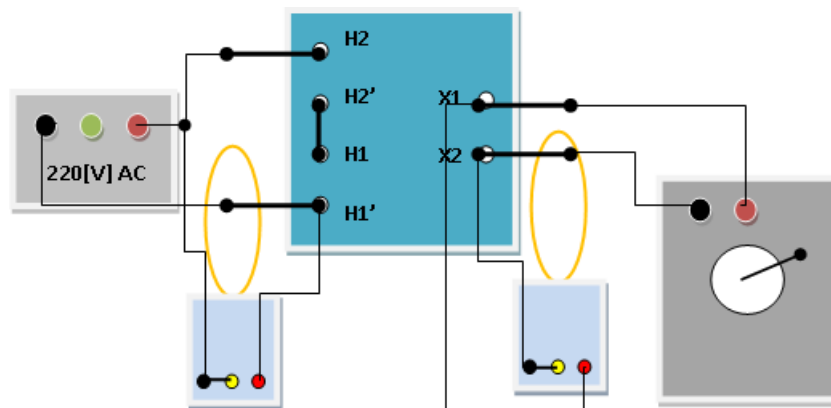


Figura 2.13: Diagrama de conexión para la prueba del transformador con carga inductiva

- Para la prueba con carga capacitiva se conectó de la siguiente forma:

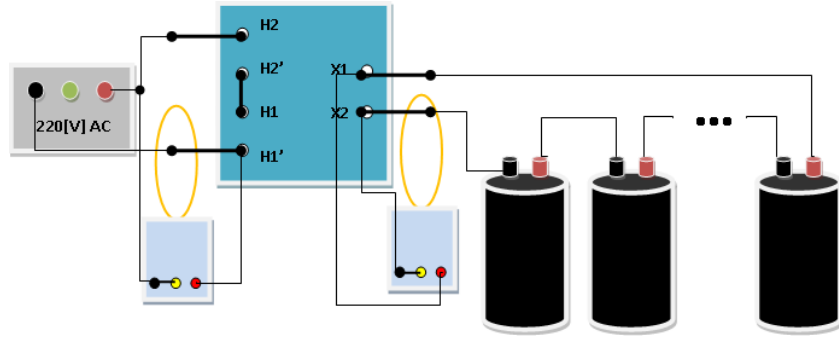


Figura 2.14: Diagrama de conexión para la prueba del transformador con carga capacitiva

Cabe destacar que los 3 puntos en el último diagrama representa la posibilidad de incluir uno o más condensadores en serie, esto para ejemplificar el hecho de que se para la prueba se utilizaron entre uno y cinco condensadores conectados en serie.

2.8.3. Condiciones de la prueba

- Para esta prueba la se utilizó la configuración 220/110[V], alimentando con tensión nominal en AT y conectando la carga en el lado de BT.
- Para cada tipo de carga se utilizaron distintos valores de estas de tal modo de tener mas de una medición por tipo de elemento.
- Los valores de las cargas no fueron tomados en cuenta, por lo que los datos estan simplemente en función de:
 - Cantidad de elementos en paralelo, para el caso de las cargas resistivas e inductivas.
 - Cantidad de vueltas, para el caso de la carga inductiva.

2.8.4. Resultados de la prueba

- Prueba con carga resistiva:

| Switchs On | Primario | | | Secundario | | | | |
|------------|----------|------|------|------------|------|------|----------------|----------|
| | V[V] | I[A] | P[W] | V[V] | I[A] | P[W] | Ef. η [%] | Reg.[%] |
| C.A. | 227.6 | 0.76 | 19 | 117.5 | 0 | 0 | 0 | -3.15 |
| 1 | 227.4 | 0.83 | 84 | 117 | 0.56 | 65 | 77.38 | -2.82 |
| 1-2 | 226.5 | 0.98 | 146 | 116.4 | 1.7 | 125 | 85.62 | -2.71 |
| 1-2-3 | 226.5 | 1.37 | 262 | 115.7 | 2.08 | 239 | 91.22 | -2.12 |
| 1-2-3-4 | 226.2 | 1.87 | 390 | 115.4 | 3.16 | 363 | 93.08 | -1.99 |
| 1-2-3-4-5 | 226.2 | 3.18 | 695 | 114 | 5.79 | 659 | 94.82 | -.79 |

Tabla 2.10: Valores reales de la prueba con carga resistiva

| Switchs On | Primario | | | Secundario | | |
|------------|------------|--------------|-------------|------------|--------------|-------------|
| | Voltaje[V] | Corriente[A] | Potencia[W] | Voltaje[V] | Corriente[A] | Potencia[W] |
| C.A. | 1.035 | 0.167 | 0.019 | 1.068 | 0.000 | 0.000 |
| 1 | 1.34 | 0.091 | 0.084 | 1.064 | 0.062 | 0.065 |
| 1-2 | 1.03 | 0.216 | 0.146 | 1.058 | 0.187 | 0.125 |
| 1-2-3 | 1.03 | 0.301 | 0.262 | 1.052 | 0.229 | 0.239 |
| 1-2-3-4 | 1.028 | 0.411 | 0.390 | 1.049 | 0.347 | 0.363 |
| 1-2-3-4-5 | 1.028 | 0.7 | 0.695 | 1.036 | 0.636 | 0.659 |

Tabla 2.11: Valores por unidad de la prueba con carga resistiva

■ Prueba con carga inductiva:

| Vueltas | Primario | | | Secundario | | | | |
|---------|----------|------|------|------------|------|------|----------------|----------|
| | V[V] | I[A] | P[W] | V[V] | I[A] | P[W] | Ef. η [%] | Reg. [%] |
| 0 | 228.7 | 1.07 | 26 | 117.3 | 0.58 | 6 | 23.80 | -2.51 |
| 1 | 228.7 | 1.18 | 27 | 117.4 | 0.84 | 8 | 29.63 | -2.6 |
| 2 | 229.3 | 1.34 | 30 | 117.4 | 1.16 | 10 | 33.33 | -2.34 |
| 4 | 228.9 | 1.74 | 35 | 116.9 | 1.94 | 14 | 40 | -2.1 |
| 6 | 228.7 | 2.23 | 44 | 116.5 | 2.92 | 20 | 45.45 | -1.85 |
| 8 | 228 | 2.84 | 54 | 115.9 | 4.1 | 26 | 48.15 | -1.64 |

Tabla 2.12: Valores reales de la prueba con carga inductiva

| Vueltas | Primario | | | Secundario | | |
|---------|------------|--------------|-------------|------------|--------------|-------------|
| | Voltaje[V] | Corriente[A] | Potencia[W] | Voltaje[V] | Corriente[A] | Potencia[W] |
| 0 | 1.04 | 0.235 | 0.026 | 1.066 | 0.064 | 0.006 |
| 1 | 1.04 | 0.26 | 0.027 | 1.067 | 0.092 | 0.008 |
| 2 | 1.042 | 0.295 | 0.030 | 1.067 | 0.127 | 0.010 |
| 4 | 1.04 | 0.383 | 0.035 | 1.063 | 0.213 | 0.014 |
| 6 | 1.04 | 0.491 | 0.044 | 1.059 | 0.321 | 0.020 |
| 8 | 1.036 | 0.625 | 0.054 | 1.054 | 0.451 | 0.026 |

Tabla 2.13: Valores por unidad de la prueba con carga inductiva

■ Prueba con carga capacitiva:

| N^o Cargas | Primario | | | Secundario | | |
|--------------|------------|--------------|-------------|------------|--------------|-------------|
| | Voltaje[V] | Corriente[A] | Potencia[W] | Voltaje[V] | Corriente[A] | Potencia[W] |
| 1 | 228.7 | 0.54 | 22 | 118.9 | 1.66 | |
| 2 | 228.6 | 1.33 | 25 | 119.6 | 3.13 | |
| 3 | 229 | 2.26 | 33 | 121.2 | 5.18 | |
| 4 | 229.3 | 3.68 | 53 | 121.3 | 6.17 | |

Tabla 2.14: Valores reales de la prueba con carga capacitiva

| N^o Cargas | Primario | | | Secundario | | |
|--------------|------------|--------------|-------------|------------|--------------|-------------|
| | Voltaje[V] | Corriente[A] | Potencia[W] | Voltaje[V] | Corriente[A] | Potencia[W] |
| 1 | 1.04 | 0.119 | 0.022 | 1.081 | 0.182 | |
| 2 | 1.039 | 0.293 | 0.025 | 1.087 | 0.344 | |
| 3 | 1.041 | 0.497 | 0.033 | 1.102 | 0.569 | |
| 4 | 1.042 | 0.810 | 0.053 | 1.103 | 0.678 | |

Tabla 2.15: Valores por unidad de la prueba con carga capacitiva

Capítulo 3

Análisis de resultados

3.1. Actividad Uno

3.1.1. Discusión

Esta actividad fue de tipo introductoria, por lo que no hay pruebas ni resultados que analizar. Se logró realizar las distintas conexiones de este transformador y se tomó nota de los valores nominales de corriente, voltaje y potencia para cada tipo de conexión(220/110 ó 110/110).

3.2. Actividad Dos

3.2.1. Comparación de resultados con valores típicos

La gran mayoría de los transformadores utiliza polaridad sustractiva, por lo que este transformador se ajusta al valor típico.

3.2.2. Discusión

Las diferencias de un transformador con polaridad sustractiva y uno con polaridad aditiva no son significativas en terminos de eficiencia, regulación o algún otro parámetro de interés ingeneril. Sin embargo las implicancias de conectar un transformador con su polaridad invertida pueden ser nefastas, es por eso que revisar la polaridad de un transformador antes de conectarlo es muy importante para un buen funcionamiento de este y del resto del circuito.

3.3. Actividad Tres

3.3.1. Comparación de resultados con valores típicos

De lo publicado en el IEEE Std 43-2000, se puede extraer una tabla que recomienda los valores mínimos de resistencia de aislación de manere muy general.

Donde kV es el voltaje rms de la bobina.

Independiente de la fecha de construcción, se puede observar que hay 3 medidas debajo del valor recomendado, Tabla2.2.

| Mínima resistencia de aislación | Especímen de prueba |
|---------------------------------|---|
| $IR_{1\min} = kV + 1$ | Para todas las bobinas fabricadas antes de 1970 y todas las bobinas de campo. |
| $IR_{1\min} = 100$ | Para la mayoría de las armaduras DC y bobinas AC fabricadas después de 1970. |

Tabla 3.1: Mínima resistencia de aislación recomendada a $40^{\circ}C$, todos los valores en $[M\Omega]$

3.3.2. Discusión

De la Tabla 2.2, los valores que aparecen con medida 'Off' son aquellos en que la resistencia de aislación superó la barrera de los $100[M\Omega]$. Del conjunto de datos puede inferirse que:

- Sólo el enrollado secundario cumple con la resistencia mínima de aislación recomendada.
- Ambos enrollados primarios presentan un deterioro en su aislación, lo que determina una resistencia de esta misma bastante inferior a lo sugerido en algunos casos.
- La diferencia entre los valores que se encuentran bajo la norma se debe principalmente a la distancia entre los elementos, se puede concluir que el enrollado H se encuentra más cerca del núcleo que el enrollado H aunque estos se encuentren a una menor distancia entre sí, en comparación a la distancia con el núcleo.

3.4. Actividad Cuatro

3.4.1. Comparación de resultados con valores típicos

Los rangos típicos para los parámetros de la rama shunt corresponden a $1[K\Omega]$ para R_{fe} y $100[\Omega]$ para X_{fe} , por lo que los valores obtenidos corresponden a las medidas típicas de éstos.

3.4.2. Discusión

Podría entenderse que no hay algún tipo de deterioro en lo que es núcleo de hierro, pues los valores de las resistencias asociadas a las pérdidas en el núcleo se mantienen dentro de los rangos esperados.

3.5. Actividad Cinco

3.5.1. Comentarios de los resultados

- Para la forma de onda de la tensión inducida en vacío puede observarse que esta corresponde a los $220[V]AC$, por lo que el transformador estaría realizando la conversión de voltajes en forma adecuada. Cabe destacar que la Fig. 2.9 muestra una onda recortada en las puntas, esto se debe a que el rango del osciloscopio llega hasta $200[V]$ peak to peak y dado que el voltaje es de $220[V]$, este no alcanza a aparecer completamente.
- Para la forma de onda de la corriente de excitación, se observa claramente la distorsión producida por inclusión de armónicas debido a la no linealidad de núcleo y su consiguiente ciclo de histéresis.

- Sobre el análisis armónico, se puede comprobar que la distorsión armónica en la corriente de excitación es de gran importancia, mientras que en la tensión esta es irrelevante. Se observa además que las componentes armónicas aumentan a medida que crece la tensión en vacío lo que tiene sentido pues recordemos que estas se deben a la no linealidad del núcleo y si se aumenta el flujo también se agranda el efecto de la histeresis, aunque no en un valor preocupante.

3.5.2. Discusión

- Debido a que el voltaje inducido en vacío responde a la ley de Faraday-Lenz, se puede concluir entonces que si no hay distorsión armónica en la inducción de flujo como señala la teoría, las pequeñas componentes armónicas que presenta deben provenir de la red de alimentación.
- Una vez alcanzada la tensión nominal, la distorsión armónica total tiende a mantenerse constante y no presentar variaciones superiores al 1 – 3 % bajo cambios en la tensión nominal.

3.6. Actividad Seis

3.6.1. Comparación de resultados con valores típicos

Los rangos típicos para los parámetros de la rama serie corresponden a $0,968[\Omega]$ para R_{eq} y $2,904[\Omega]$ para X_{eq} , por lo que el valor de $R_{eq} = 1,6$ se considera cercano al rango. Por otra parte se observa que las reactancias de magnetización son ligeramente mas bajas, esto puede deberse al criterio de diseño del transformador donde la longitud del alambre hace que el factor resistivo predomine por sobre las pérdidas de flujo magnético.

3.7. Actividad Siete

3.7.1. Discusión

Con respecto a la eficiencia se puede inferir lo siguiente:

- La eficiencia del transformador disminuye conforme se aumenta la carga, ya sea esta resistiva, inductiva o combinación de ambas, sin embargo entre estos dos tipos de carga las del tipo resistivas presentan una eficiencia mayor al 50 % en todos los casos, no así las del tipo inductivas que llegan a presentar una eficiencia del 23,8 % y que no superan el 50 % de rendimiento.

Capítulo 4

Conclusiones

4.1. Conclusiones generales

- Como se pudo constatar, los transformadores monofásicos pueden ser de más de dos enrollados con lo cual, según su conexión, pueden obtenerse varios niveles de voltaje.
- El transformador utilizado posee 2 bobinas de 110V, 4.6A y 1 bobina de 110V, 9.1A; en que las primeras pueden conectarse en serie, paralelo o de forma individual, por lo tanto, y basándose en los valores nominales mostrados en los datos de placa, pudo determinarse las magnitudes de corriente y tensión para las distintas conexiones.
- De la prueba de polaridad externa se obtuvo que ésta corresponde al tipo sustractiva. Como una forma de validar el resultado, cabe destacar que la mayor parte de los transformadores poseen ese tipo de polaridad.
- Mediante los ensayos en circuito abierto y cortocircuito, fue posible determinar las características de excitación y los parámetros de impedancia y reactancia del circuito equivalente, lo cual permitió obtener un modelo equivalente del transformador. Al respecto, se hace hincapié en el hecho que las pérdidas ocurridas en transformadores reales deben necesariamente considerarse si se quiere obtener un modelo confiable de su comportamiento.
- La obtención de valores negativos de regulación para cargas puramente capacitivas y resistivas-capacitivas se explica en base al hecho que...
- En relación al contenido armónico medido, en particular para la corriente de excitación, destaca la obtención de valores de distorsión armónica total cercanos al 45 % a tensión de alimentación nominal, sobretodo por el hecho que la aparición de corriente armónicas en el sistema eléctrico crea problemas tales como, el aumento de pérdidas de potencia activa, sobretensiones en los condensadores, errores de medición, mal funcionamiento de protecciones, daño en los aislamientos, deterioro de dieléctricos y disminución de la vida útil de los equipos.

4.2. Comentarios sobre la experiencia

Comentarios sobre la guía de trabajo:

- En la parte tres del trabajo de laboratorio, sería de ayuda si se explicitara que el núcleo del transformador corresponde también a la carcasa.
- En la sección de las pruebas de los transformados, podría explicarse el orden de correcto encendido y apagado de los elementos que se utilizan con el fin de evitar daño a los equipos y/o situaciones de riesgo.
- En la parte siete, sería de gran ayuda si se sugiriera la cantidad y los tipos de carga a conectar, pues los grupos tienden a conectar las cargas en las secuencias mas triviales y estas no siempre son buenas opciones para obtener resultados significativos que permitan hacer un buen análisis posterior.

Comentarios sobre la el trabajo en el laboratorio:

- Muy buena distribución de elementos, se tuvo todo lo necesario para realizar la experiencia.
- Muy buen estado de las maquinas e instrumentos utilizados, permitio no retrasar el trabajo y terminar a tiempo la experiencia.

Otras cosas que se pueden hacer con latex

Nota al pie de página

Frase con pie de página¹.

Tablas bonitas

| Cond. anormal | | $n_s[rpm]$ | $I_{est}[A]$ | $V_{maq}[V]$ |
|----------------------|---------|------------|--------------|--------------|
| $V_{maq} = 240[V]$ | Antes | 1510 | 0 | 240 |
| | Después | 1501 | 1,14 | 228 |
| $V_{maq} = 212,5[V]$ | Antes | 1514 | 0 | 212,5 |
| | Después | 1500 | 1,41 | 227,4 |
| $w = 1550[rpm]$ | Antes | 1550 | 0 | 223,3 |
| | Después | 1501 | 2,06 | 228,4 |
| $w = 1450[rpm]$ | Antes | 1450 | 0 | 220,1 |
| | Después | 1500 | 0,94 | 227,6 |

Tabla 4.1: Sincronización en condiciones anormales.

Referencias bibliográficas

Frase con cita bibliográfica [5]

¹Inserte aquí su explicación de pie de página.

Índice de figuras

| | |
|---|----|
| 1.1. Circuito equivalente aproximado del transformador monofásico. | 4 |
| 1.2. Equivalente para la prueba de circuito abierto. | 5 |
| 1.3. Equivalente para la prueba de corto circuito. | 6 |
| 1.4. Tipos de polaridad externa. | 7 |
| 1.5. Método de corriente continua para determinar la polaridad. | 7 |
| 2.1. Dibujo de cada uno de los elementos utilizados en los diagramas de conexión, de todas las actividades del trabajo de laboratorio | 10 |
| 2.2. Configuración 220/110[V] para transformados monofásico de 3 enrollados | 10 |
| 2.3. Configuración 110/110[V] para transformados monofásico de 3 enrollados | 11 |
| 2.4. Diagrama de conexión para la medida de polaridad | 12 |
| 2.5. Diagrama de conexión para la medida de aislacion entre secundario X y primario H' | 13 |
| 2.6. Diagrama de conexión para la prueba de circuito abierto | 15 |
| 2.7. Diagrama de conexión para la medición de las formas de onda de tensión y corriente | 17 |
| 2.8. Diagrama de conexión para la medición de las componentes armónicas de tensión y corriente | 17 |
| 2.9. Forma de onda de la tensión inducida en vacío. | 18 |
| 2.10. Forma de onda de la tensión inducida en vacío. | 18 |
| 2.11. Diagrama de conexión para la prueba de corto circuito | 19 |
| 2.12. Diagrama de conexión para la prueba del transformador con carga resistiva | 21 |
| 2.13. Diagrama de conexión para la prueba del transformador con carga inductiva | 21 |
| 2.14. Diagrama de conexión para la prueba del transformador con carga capacitiva | 22 |

Índice de tablas

| | |
|---|----|
| 2.1. Valores en magnitud real | 11 |
| 2.2. Valores de resistencia de aislación en magnitud real | 14 |
| 2.3. Valores de resistencia de aislación en por unidad | 14 |
| 2.4. Resultados prueba de circuito abierto, transformador monofásico. | 16 |
| 2.5. Valores rama de magnetización del circuito equivalente aproximado. | 16 |
| 2.6. Valores de las componentes armónicas de la corriente de excitación y de la tensión en vacío. | 19 |
| 2.7. Valores de las componentes armónicas de la corriente de excitación y de la tensión en vacío a 150 % de su valor nominal. | 19 |
| 2.8. Resultados prueba de corto circuito, transformador monofásico. | 20 |
| 2.9. Valores rama serie del circuito equivalente aproximado. | 20 |
| 2.10. Valores reales de la prueba con carga resistiva | 22 |
| 2.11. Valores por unidad de la prueba con carga resistiva | 23 |
| 2.12. Valores reales de la prueba con carga inductiva | 23 |
| 2.13. Valores por unidad de la prueba con carga inductiva | 23 |
| 2.14. Valores reales de la prueba con carga capacitiva | 24 |
| 2.15. Valores por unidad de la prueba con carga capacitiva | 24 |
| 3.1. Mínima resistencia de aislación recomendada a 40°C, todos los valores en $[M\Omega]$ | 26 |
| 4.1. Sincronización en condiciones anormales. | 30 |

Bibliografía

- [1] J. Romo y L. Vargas. Apuntes de Conversión Electromecánica de la Energía. Departamento de Ingeniería Eléctrica, U. de Chile. 2007.
- [2] Máquinas Eléctricas. Publicación C/4, Departamento de Ingeniería Eléctrica, U. de Chile. 1996.
- [3] S.A. Nasar y L.E. Unnewehr. Electromechanics and Electric Machines. 1era edición, ed. John Wiley & Sons, 1979.
- [4] M. Liwschitz-Garik y C. Whipple. Direct Current Machines. 2da edición, ed. D. Van Nostrand Company, 1972.
- [5] Walter Brokering Christie, Rodrigo Palma Behnke y Luis Vargas Días. Ñom Lufke o Los Sistemas Eléctricos de Potencia
- [6] IEEE Std 43-2000 (Revision of IEEE Std 43-1974) IEEE Recommended Practice for Testing Insulation Resistance of Rotating Machinery, Electric Machinery Committee of the IEEE Power Engineering Society. Pag.17.