



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO



FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES ARAGÓN

INGENIERÍA MECÁNICA ELÉCTRICA

**“PRUEBAS BÁSICAS A TRANSFORMADORES
DE POTENCIA”**

TESIS

Que presenta

González Flores Victor Leonel

Para obtener el título de

Ing. Mecánico-Electricista

Asesor: Ing. Mejía Roldán José Juan Ramón



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

ÍNDICE	II
Introducción	III
Capítulo I ANTECEDENTES TEORICOS.	6
1.1 Campo magnético	8
1.2 Ley de Faraday	9
1.3 Producción de un campo magnético	12
1.4 Materiales magnéticos y sus propiedades	15
1.5 Curva de histéresis	17
Capítulo II GENERALIDADES DE UN TRANSFORMADOR	19
2.1 Principio de funcionamiento del transformador.	20
2.2 Transformador ideal en vacío.	21
2.3 Transformador ideal con carga.	26
2.4 Transformador real.	30
2.5 Transformador real en vacío.	31
2.6 Transformador real con carga.	33
2.7 Diagramas fasoriales del transformador real.	35
2.8 Circuito equivalente exacto del transformador real.	39
2.9 Circuito equivalente aproximado del transformador real.	42
2.10 Circuito equivalente simplificado.	44
2.11 Determinación de las constantes del transformador.	46
2.12 Porcentaje de impedancia	53
2.13 Eficiencia.	53
2.14 Regulación de voltaje.	55
2.15 Transformadores trifásicos	57
2.16 Normalización de terminales	57

2.17 Conexión de transformadores en paralelo	58
2.18 Conexiones de transformadores trifásicos.	59
Capítulo III PRUEBAS CON BAJA Y ALTA TENSIÓN.	69
3.1. Medición de la resistencia óhmica.	69
3.1.1 Método de caída de tensión	70
3.1.2 Método de puente.	73
3.2. Medición de la resistencia de aislamiento.	75
3.3 Relación de transformación.	75
3.3.1 Método de los dos voltmetros.	77
3.3.2 Método del transformador patrón.	78
3.3.3 Método del potenciómetro de resistencia.	81
3.4 Polaridad o secuencia de fases.	82
3.4.1 Prueba de polaridad.	82
3.4.2 Método del transformador patrón	83
3.4.3 Método de dos voltímetros	84
3.4.4 Método de la descarga inductiva	84
3.4.5 Prueba de secuencia de fases	85
3.5. Desplazamiento angular y verificación del diagrama fasorial	86
3.6 Pérdidas magnéticas y corriente de excitación	89
3.7 Pérdidas eléctricas y porcentaje de impedancia.	92
3.7.1 Porcentaje de impedancia	97
3.8 Elevación de la temperatura	98
3.8.1 Carga del transformador	101
3.8.2 Método de carga real	101
3.8.3 Métodos de carga simulada	101
3.8.3.1 Método de corto-circuito	102

3.8.3.2 Método de oposición	103
3.8.3.3 Método de auto-oposición	104
3.9 Rigidez dieléctrica del aceite.	106
3.10 Potencial aplicado	108
3.11 Potencial inducido	110
Capítulo IV DESARROLLO Y EJECUCIÓN DE LAS PRUEBAS EN BAJA TENSIÓN	
4.1 Medición de la resistencia óhmica	112
4.2 Medición de la resistencia de aislamiento	116
4.3 Relación de transformación	122
4.4 Polaridad en el transformador	125
4.5 Ensayo de circuito abierto (pérdidas magnéticas)	128
4.6 Ensayo de corto circuito (pérdidas eléctricas)	131
CONCLUSIONES	134
BIBLIOGRAFÍA	140
DEFINICIONES	141

INTRODUCCIÓN

Actualmente la distribución masiva de la potencia eléctrica en su modalidad de corriente directa prácticamente ya desapareció. La distribución de la energía eléctrica en su modalidad de corriente alterna se hizo casi universal a mediados del siglo XX. La vida moderna, prácticamente en todos los aspectos, desde la industria como en los servicios públicos y en el uso doméstico, depende de la energía eléctrica.

Es muy importante reducir al mínimo las fallas en el suministro de energía eléctrica para garantizar una alta confiabilidad en el equipo que integran los sistemas eléctricos de potencia.

Dentro de estos sistemas de transmisión y distribución de energía eléctrica el papel que desempeñan los transformadores es primordial. Por tanto, el control de calidad en la manufactura y mantenimiento de los mismos nos permiten contar con una garantía adecuada del servicio.

Por esta razón existe una serie de pruebas que nos permite estimar si el equipo puede trabajar de acuerdo a las especificaciones de diseño.

Se han establecido normas para fijar los criterios y procedimientos para realizar estas pruebas tanto nacionales como internacionales. Este trabajo se basa en la norma NMX-J-169-ANCE para transformadores de distribución y de potencia.

De esta forma el objetivo fundamental de esta investigación es presentar las principales pruebas de laboratorio que se realizan a los transformadores de potencia y posteriormente realizarlas en el laboratorio L1 de la Facultad de Estudios Superiores Aragón para determinar los distintos parámetros con los cuales podemos realizar una evaluación del estado en que se encuentran los módulos de transformador con los que cuenta el laboratorio.

Este trabajo queda estructurado de la siguiente manera:

En el capítulo uno explicamos los antecedentes teóricos, es decir, las leyes físicas que rigen el principio del funcionamiento del transformador, específicamente la ley de Lenz, ley de Faraday y ley de Ampere.

Una vez comprendidos estos conceptos en el capítulo dos hablamos de las generalidades de un transformador, en donde se explican los conceptos de “transformador ideal” y “transformador real” tanto en vacío como con carga y el comportamiento de los mismos sometidos a estas condiciones.

En el capítulo tres hacemos una descripción, de las pruebas de laboratorio tanto en alta como en baja tensión para los transformadores de potencia.

El capítulo cuatro es la ejecución de las pruebas en el laboratorio L1 de la Facultad de Estudios Superiores Aragón, y de esta manera poder determinar las condiciones de los módulos de transformador.

CAPÍTULO 1. ANTECEDENTES TEORICOS

La ventaja de la corriente alterna sobre la corriente directa en la distribución de la energía se basa en la facilidad que la primera tiene para cambiar sus niveles de voltaje. Las líneas de potencia de alto voltaje transportan la energía con corrientes recíprocamente más bajas. A partir de la elemental ley de ohm, la caída de voltaje en un resistor se relaciona con su resistencia y la corriente a través de él. Como la corriente de una línea de potencia o de un conductor está relacionada con el área de la sección transversal, los alambres más grandes tendrán menor resistencia. Sin embargo una línea de potencia de gran longitud tendrá un costo excesivo si se le da una sección transversal grande. En la siguiente figura se muestra una línea de distribución de alto voltaje de ca.

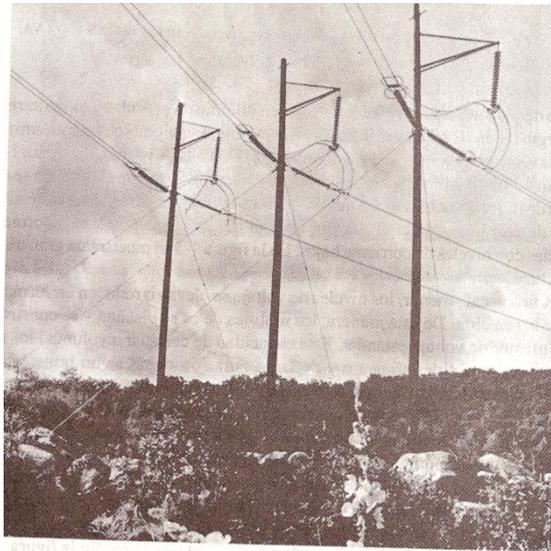


Figura 1. Moderna línea de distribución de 345 kv

Usando voltajes muy altos en las líneas de distribución de potencia es posible mantener las corrientes requeridas en niveles muy bajos. Esto significa pérdidas de potencia menores en las líneas. El problema con la energía de cd es que sólo puede generarse a niveles relativamente bajos de algunos miles de volts, debido a las limitaciones de las escobillas y el conmutador de los generadores. Una vez generado, el voltaje no puede elevarse a niveles más altos por ningún medio apropiado, a menos en lo que concierne a los niveles de potencia elevados.

Una vez generada la corriente alterna (ca) y elevada mediante transformadores a unos cientos de miles de volts, la corriente ca puede rectificarse por medio de dispositivos de estado sólido.

La corriente alterna puede generarse a 18 000 volts o más. La figura 1.1 muestra un alternador síncrono típico de alto voltaje. Mediante el uso de transformadores la salida se eleva a niveles de varios cientos de miles de volts.

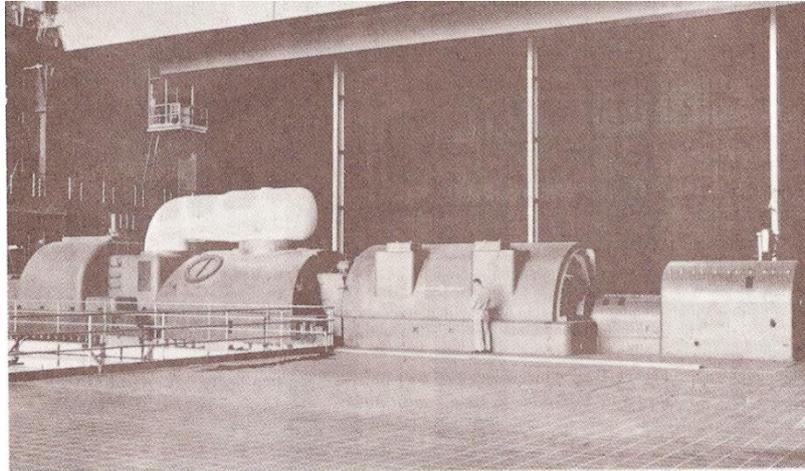


Figura 1.1 Alternador síncrono típico de 150 000 KVA

Esto quiere decir que podrán transportarse potencias enormes a lo largo de grandes distancias con niveles de corriente bajos. En la figura 1.2 se muestra un transformador elevador de alto voltaje.

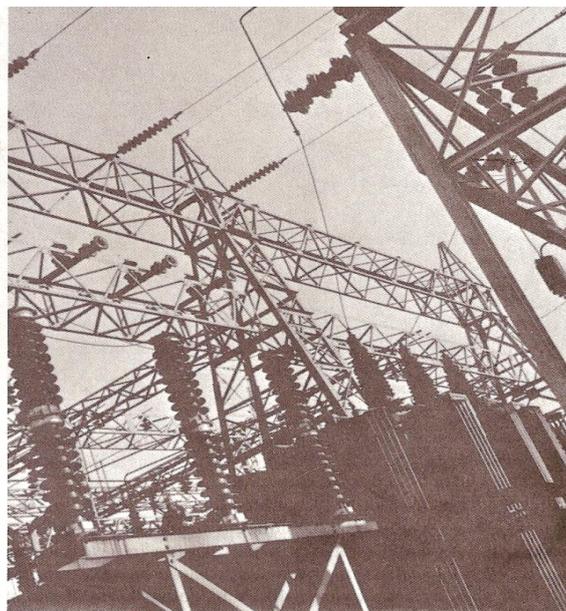


Figura 1.3 Gran transformador típico de alto voltaje y la estructura asociada de conexiones

A una escala menor, los niveles de voltaje se reducen o elevan de forma local en transformadores de distribución. De esta manera los motores de ca se diseñan y se construyen para cualquiera de varios niveles de voltaje estándar. Esta capacidad de cambiar a voluntad los niveles de voltaje en un dispositivo tan simple, eficiente y de larga duración como es un transformador no existe para la corriente directa.

1.1 Campo magnético

Un campo magnético es un campo de fuerza creado como consecuencia del movimiento de cargas eléctricas (flujo de la electricidad).

La fuerza (intensidad o corriente) de un campo magnético se mide en Gauss (G) o Tesla (T).

El flujo decrece con la distancia a la fuente que provoca el campo.

El campo magnético es una región del espacio en la cual una carga eléctrica puntual de valor q que se desplaza a una velocidad, sufre los efectos de una fuerza que es perpendicular y proporcional tanto a la velocidad como al campo. Así, dicha carga percibirá una fuerza descrita con la siguiente igualdad.

$$\mathbf{F} = q\mathbf{v} \times \mathbf{B} \quad (1.0)$$

Donde F es la fuerza, v es la velocidad y B el campo magnético, también llamado inducción magnética y densidad de flujo eléctrico. (Nótese que tanto F como v y B son magnitudes vectoriales y el producto vectorial es un producto vectorial que tiene como resultante un vector perpendicular tanto a v como a B). El módulo de la fuerza resultante será:

$$|\mathbf{F}| = q|v| |\mathbf{B}| \cdot \sin \theta \quad (1.1)$$

La existencia de un campo magnético se pone de relieve gracias a la propiedad localizada en el espacio de orientar un magnetómetro (laminilla de acero imantado que puede girar libremente). La aguja de una brújula, que evidencia la existencia del campo magnético terrestre, puede ser considerada un magnetómetro.

Un alambre que conduce electricidad produce un campo magnético a su alrededor, la dirección del campo se puede determinar por la regla de la mano derecha.

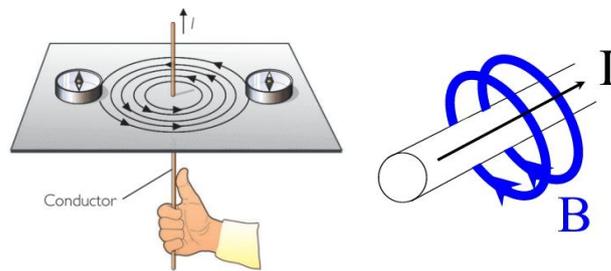


Figura 1.4 Representación de la regla de la mano derecha.

Para aplicar dicha regla, realizaremos el siguiente proceso. Tomamos el hilo conductor con la mano derecha colocando el dedo pulgar extendido a lo largo del hilo en el sentido de la corriente. Los otros dedos de la mano indican el sentido de las líneas de fuerza del campo magnético creado.

Un campo magnético variable con el tiempo induce un voltaje en una bobina de alambre, si pasa a través de dicha bobina.

1.2 Ley de Faraday.

Cuando un conductor corta líneas de flujo magnético se produce una fuerza electromotriz entre los puntos extremos del conductor.

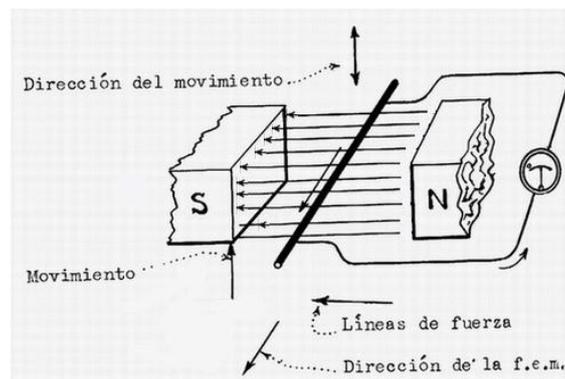


Figura 1.5 Determinación del sentido de la fem

Por ejemplo, se induce una corriente eléctrica en el conductor a medida que se mueve hacia arriba y corta las líneas de flujo, el sentido de ésta corriente se define por medio de la regla de la mano derecha de la siguiente manera:

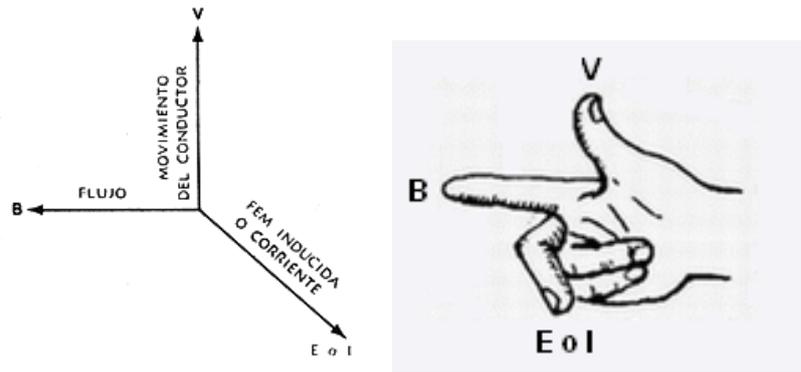


Figura 1.6 Representación vectorial de la regla de la mano derecha

De esta manera notamos que la dirección de la corriente es saliente. Cuando el conductor se mueve hacia abajo y corta las líneas de flujo se observa un fenómeno análogo, excepto que la corriente se invierte.

Supóngase que cierta cantidad de conductores se mueve a través de un campo magnético, como se indica con el movimiento de una bobina de N vueltas a través de las líneas de flujo como se muestra

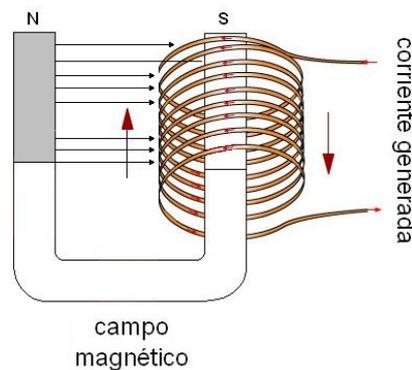


Figura1.7 Movimiento vertical de una bobina a través de un campo magnético

La magnitud de la corriente inducida es directamente proporcional al número de espiras y a la rapidez del movimiento. Es evidente que se induce una fem debido al movimiento relativo entre el conductor y el campo magnético. El mismo efecto se observa cuando la bobina se mantiene estacionaria y el imán se mueve hacia arriba.

La dirección de la fem inducida depende de la dirección del movimiento del conductor con respecto al campo

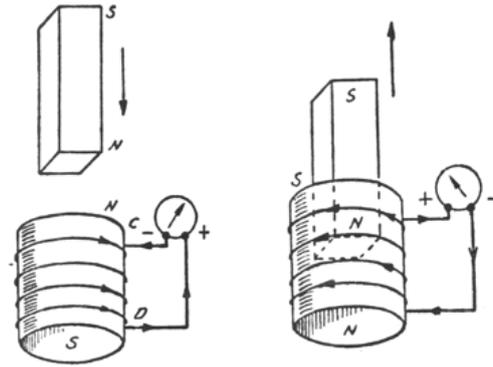


Figura 1.8 Movimiento vertical de un imán a través de una bobina

Una relación cuantitativa para calcular la fem inducida en una bobina de N vueltas está expresada por

$$\varepsilon = -N \frac{\Delta\Phi}{\Delta t} \quad (1.2)$$

Donde:

ε = Fem inducida media

$\Delta\Phi$ = Cambio en el flujo magnético que ocurre durante un intervalo de tiempo Δt .

Tal como se estableció anteriormente, los campos magnéticos son los mecanismos fundamentales por medio de los cuales la energía se convierte de una forma en otra, en motores, generadores y transformadores.

En resumen; cuatro principios básicos describen como se utilizan los campos magnéticos en estos aparatos:

- 1.- Un alambre cargado de electricidad produce un campo magnético a su alrededor.
- 2.- Un campo magnético variable a través del tiempo induce un voltaje en una bobina de alambre si pasa a través de dicha bobina. (Esta es la base del funcionamiento del transformador).
- 3.- Un alambre cargado de corriente en presencia de un campo magnético tiene una fuerza inducida sobre él. (Esta es la base del funcionamiento del motor).

4.- Un alambre en movimiento, en presencia de un campo magnético, tiene un voltaje inducido sobre él. (Esta es la base del funcionamiento del generador).

1.3 Producción de un campo magnético.

La ley básica que rige la producción de un campo magnético por medio de una corriente es la ley de Ampere:

$$\oint \mathbf{H} \, d\mathbf{l} = I_{net} \quad (1.3)$$

En donde \mathbf{H} es la intensidad del campo magnético producido por la corriente I_{net} . En las unidades del SI, I se mide en amperios y \mathbf{H} en amperio-vueltas por metro. Para entender mejor el significado de esta ecuación es muy útil aplicarla al ejemplo de la siguiente figura:

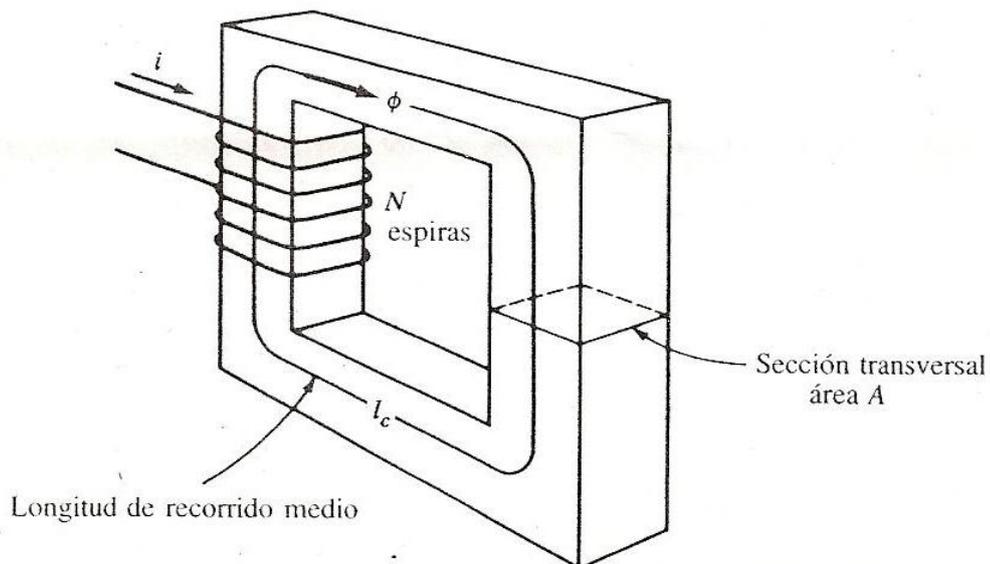


Figura 1.9 Núcleo magnético sencillo

La figura muestra un núcleo rectangular con un embobinado de alambre de N vueltas en torno a una columna del núcleo. Si el núcleo está hecho de hierro u otros materiales similares (comúnmente llamados materiales ferromagnéticos). Todo el campo producido por la corriente permanecerá esencialmente dentro del núcleo, de tal modo que el recorrido de la integración en la ley de Ampere es la longitud media del recorrido del núcleo l_c . La corriente que pasa dentro del recorrido de integración I_{net} es entonces Ni , puesto que la bobina abraza

el recorrido de integración N veces, mientras conduce la corriente I , La ley de ampere se vuelve entonces:

$$Hl = Ni \quad (1.4)$$

Aquí H es la magnitud del campo magnético

Si en un conductor circula una corriente variante en el tiempo (c.a.) entonces se crea un campo magnético también variante en el tiempo alrededor del conductor, y si se coloca un conductor en el área de influencia del campo magnético entonces se inducirá una f.e.m. en el conductor (principio del transformador, mostrado en la siguiente figura:

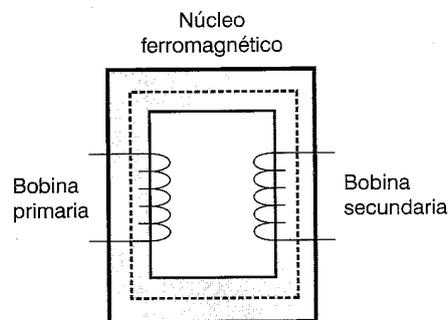


Figura 1.10 Principio del transformador

Cuyo valor está dado por:

$$V = - \frac{d\Phi}{dt} \quad (1.5)$$

En donde Φ es el flujo por espira. Si $\Phi = N \phi$ es el flujo por bobina, siendo N el número de vueltas por bobina, entonces el voltaje inducido en una bobina está dado por:

$$V = - \frac{d\Phi}{dt} \quad (1.6)$$

El signo negativo de la ecuación es debido a la ley de Lenz, que afirma que todo voltaje inducido se opone a la causa que lo produce.

Imán permanente. Los imanes naturales presentan en sus extremos dos puntos de máxima fuerza llamados polo norte y sur, mientras que en el centro se tiene una fuerza nula. En la figura x se puede observar las líneas de fuerza asociadas a un imán. Por otro lado, cuando se acercan dos polos iguales se rechazan, y si se coloca un material no magnético en la trayectoria de las líneas de flujo estas no sufren un cambio perceptible.

Electroimán. Es un imán artificial creado mediante una bobina enrollada sobre un núcleo ferromagnético. La principal ventaja de este imán con respecto al natural es el control de la intensidad de campo mediante la variación de la corriente o la cantidad de vueltas en la bobina.

Materiales Ferromagnéticos. Esta propiedad se encuentra en ciertos materiales como el hierro, cobalto, níquel, acero y aleaciones entre estos metales. A dichas formas y a las aleaciones se les da el nombre de materiales ferromagnéticos debido a su alta permeabilidad y a su fácil imantación. Al emplear dichas sustancias como núcleo de maquinas y dispositivos eléctricos se obtiene una inducción magnética muy alta en relación a la obtenida en una bobina con núcleo de aire o al empleo de materiales no magnéticos como el cobre, madera, aluminio, vidrio. En el caso de un material ferromagnético de un transformador, la permeabilidad relativa puede estar entre los rangos de 2000 y 4000.

Los materiales no magnéticos se clasifican en paramagnéticos para los cuales la permeabilidad relativa (μ_R) es ligeramente superior a 1.0 o diamagnéticos en los cuales la μ_R es ligeramente inferior a 1.0.

Permeabilidad de un material. Si el material en un circuito magnético permite establecer fácilmente las líneas de flujo se dice que este tiene alta permeabilidad, en caso contrario tiene baja permeabilidad. El termino permeabilidad es similar al de conductividad en un circuito eléctrico.

La permeabilidad de un material está dada en función de su permeabilidad relativa como se muestra a continuación.

$$\mu = \mu_R \mu_0 \quad (1.7)$$

En donde $\mu_0 = 4\pi * 10^{-7}$ H/m es la permeabilidad del espacio (aire). En el sistema internacional (SI) las unidades de μ_0 son Henry/metro (H/m).

1.4 Materiales magnéticos y sus propiedades.

Los materiales se clasifican en magnéticos y no magnéticos, dependiendo de su magnetización o su curva $B - H$. Los materiales no magnéticos tienen una curva $B - H$ lineal, mientras que los materiales ferromagnéticos muestran una característica $B - H$ no lineal.

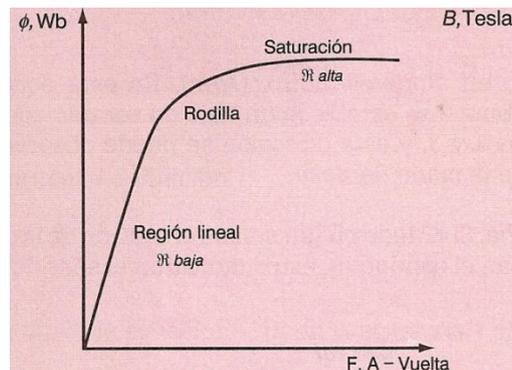


Figura 1.11 Curva de magnetización de un material ferromagnético

En esta curva de magnetización se puede observar otra diferencia importante entre los circuitos magnéticos y los eléctricos, debido a que en un circuito eléctrico la resistencia es normalmente independiente de la corriente mientras que en un circuito magnético la reluctancia depende de la densidad de flujo. La curva de la figura 11 se divide en dos regiones: la región lineal y la región de saturación, y la transición entre ambas se conoce como codo o rodilla.

Formas de núcleos ferromagnéticos. Se encuentran disponibles en gran variedad de formas y tamaños según el tipo de aplicación. Particularmente para los núcleos de ferrita se tienen los tipos dona o toroidal, núcleos en formas de U, E e I con entrehierro. Los materiales laminados están disponibles en toroides bobinados y núcleos en forma de C, núcleo en forma de doble E e I.

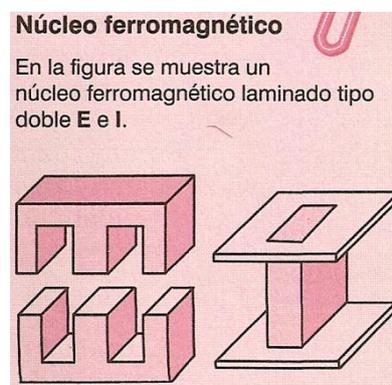


Figura 1.12 Tipos de laminaciones comunes para los núcleos ferromagnéticos

Como las leyes de los circuitos eléctricos se pueden aplicar de forma similar a los circuitos magnéticos, para calcular los parámetros en los núcleos de las máquinas eléctricas se requiere únicamente conocer la forma del material ferromagnético, y entre las más comunes se tienen el tipo columna y el tipo acorazado que se muestran en la figura 1.13. Estos tipos de núcleos se emplean según la aplicación particular de cada proyecto, ya que cada uno de ellos tiene sus ventajas y desventajas. En un núcleo tipo columna los conductores rodean al material ferromagnético mientras que en el tipo acorazado el material ferromagnético rodea a los conductores.

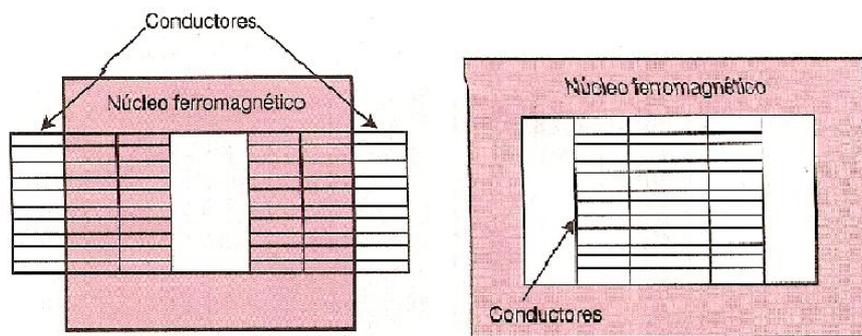


Figura 1.14 Tipos de núcleos ferromagnéticos, tipo columna y tipo acorazado

Los sistemas eléctricos de potencia son de forma senoidal, por lo tanto las máquinas eléctricas y los transformadores funcionan con este tipo de señal en la mayoría de los casos. Esta fuente de excitación tiene asociadas algunas pérdidas en condiciones de estado estable en los circuitos magnéticos, una parte de esta energía se disipa en forma de calor, como resultado del calentamiento del núcleo, mientras que el resto es una potencia reactiva asociada con la energía almacenada en el campo magnético, la cual no es disipada sino que es absorbida por la fuente de excitación.

Los dos tipos de pérdidas asociadas con la excitación variante en el tiempo tipo senoidal en los materiales ferromagnéticos son: la pérdida por calentamiento I^2R debido a la variación en el tiempo del flujo en la trayectoria del material magnético, lo cual resulta de que se induce un voltaje en dicha trayectoria que a su vez provoca la circulación de una corriente llamada corriente de Eddy en la resistencia intrínseca del material magnético causando el calentamiento; la pérdida que se debe a la curva de histéresis que se genera con la orientación de los dominios del material. La suma de estas dos pérdidas conforman las pérdidas totales del material magnético de una máquina.

En una fuente de excitación senoidal, el voltaje y el flujo magnético son variantes en el tiempo. Considerando que el flujo magnético $\Phi(t)$ del núcleo de la figura 1.15 es de forma senoidal.

$$\Phi = \Phi_{max} \sin \omega t \quad (1.8)$$

en donde $\Phi(t)$ es el flujo instantáneo en un tiempo t , Φ_{max} es el flujo máximo y $\omega = 2\pi f$ es la velocidad angular.

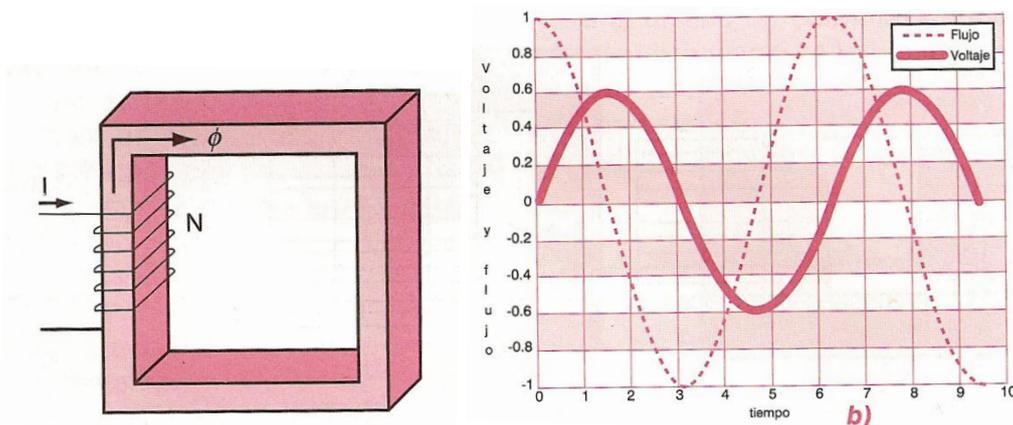


Figura 1.15 Excitación senoidal en un núcleo ferromagnético y formas de voltaje inducido con respecto al flujo magnético

El voltaje inducido en las N vueltas de la bobina es:

$$V(t) = N \frac{d\Phi(t)}{dt} = N\Phi_{max}\omega \cos \omega t = 2\pi f N \Phi_{max} \cos \omega t \quad (1.9)$$

y la raíz cuadrática media (rms) del voltaje inducido es

$$V(t) = \frac{2\pi}{\sqrt{2}} N f \Phi_{max} = 4.44 N f \Phi_{max} \quad (1.10)$$

1.5 Curva de histéresis

La curva de histéresis de un material ferromagnético es muy importante, debido a que muestra el comportamiento del material a medida que se modifica la corriente que alimenta a una bobina con núcleo ferromagnético. Si el núcleo no presenta magnetismo residual, y la corriente que alimenta a la bobina es cero, entonces la posición correspondiente está en el origen de la curva de histéresis de la figura 1.16.

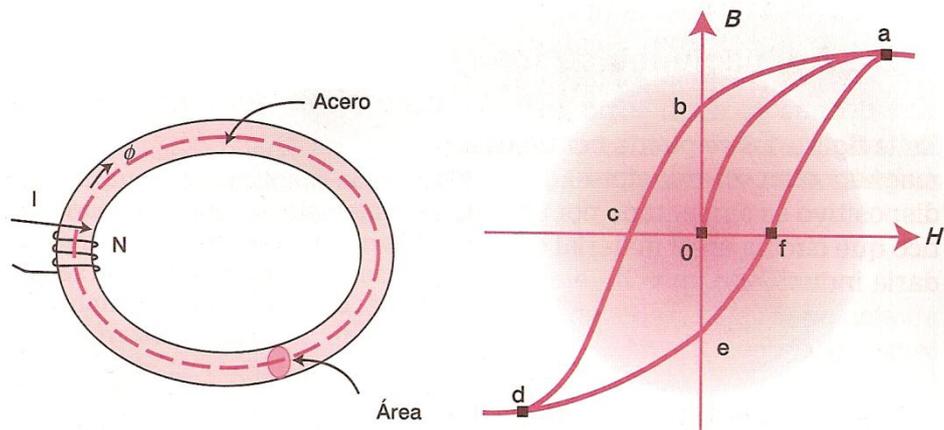


Figura 1.16 Curva de histéresis en un material ferromagnético

A medida que la corriente aumenta, también aumenta la intensidad de campo magnético H así como la densidad de campo B hasta llegar a la saturación del material (punto a), y en este punto aunque la corriente siga aumentando la B prácticamente se mantiene constante y la H incrementa rápidamente. Si la corriente disminuye, $I = 0$, $H = 0$, el material retiene una densidad de flujo B en el punto b llamado flujo residual. Si la corriente incrementa en sentido contrario hasta que $B=0$, el núcleo retiene una intensidad H en el punto c llamado fuerza coercitiva, si la corriente sigue aumentando se llega nuevamente al estado de saturación en el punto d, si se disminuye la corriente hasta cero se llega al punto e que es el punto opuesto al punto b en donde la $H = 0$, este sería el punto inicial de la curva de histéresis nuevamente ($I = 0$, $H = 0$, $B = 0$), pero como se observa en la curva el núcleo ya tiene un flujo residual que impide que la curva empiece nuevamente en el origen.

El área dentro de la curva de histéresis representa el trabajo realizado por el material cuando se le aplica un flujo magnético. El trabajo (energía) es disipado en el material en forma de calor. Las pérdidas por histéresis en el núcleo del material ferromagnético incrementan cuando incrementa la frecuencia de conmutación sobre el flujo magnético ϕ y la densidad del flujo B .

CAPÍTULO 2. GENERALIDADES DE UN TRANSFORMADOR

El transformador es un dispositivo estático, es decir, sin partes móviles, destinado a transferir energía eléctrica de un circuito a otro, siendo el enlace común entre ambos circuitos un flujo magnético común.

El transformador queda comprendido dentro del estudio de las “máquinas eléctricas”, aunque no es, propiamente una “máquina”, ya que el concepto “máquina” presupone siempre órganos en movimiento.

El transformador modifica energía eléctrica de unas características determinadas de tensión y corriente en energía, también eléctrica, pero de diferentes características de tensión y de corriente.

Los transformadores son los equipos eléctricos más eficientes ya que al no tener partes en movimientos, no existen pérdidas por fricción o rozamiento, es capaz de cambiar valores de tensión y corriente sin alterar la frecuencia ni la potencia de una forma significativa.

Una de las principales razones por las que se emplea corriente alterna y no la corriente continua en la producción, transporte, distribución y consumo de electricidad es que este tipo de corriente es muy fácil de elevar y reducir su tensión mediante el transformador. Gracias a los transformadores es posible aumentar la tensión antes de transportar la energía a grandes distancias por las líneas de alta tensión, con el fin de reducir la intensidad y con ella las pérdidas que se dan en los conductores por el efecto joule. Con ellos también se puede reducir la tensión, con el fin de poder distribuirla y consumirla en grandes industrias y viviendas.

Aparte de estas aplicaciones, los transformadores también se utilizan para separar eléctricamente los circuitos, alimentar con pequeñas tensiones circuitos de mando de sistemas neumáticos, alimentar todo tipo de aparatos electrónicos, adaptar aparatos eléctricos a la tensión de red cuando ésta es superior o inferior a la nominal de los mismos, acondicionar grandes tensiones y corrientes para poder ser medidas sin dificultad.

En su forma más sencilla, un transformador es un circuito magnético constituido por láminas apiladas de material ferromagnético sobre el que se enrollan dos bobinas B_1 y B_2 , conectadas como se indica en la figura 2.0.

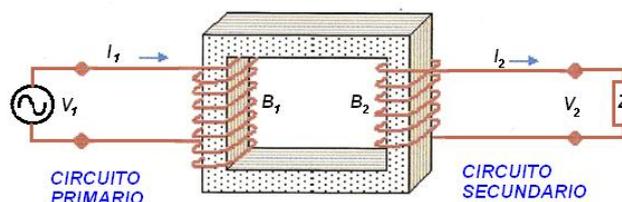


Figura 2.0 El transformador en su forma más sencilla

En donde:

V_1 = Voltaje primario del transformador

I_1 = Corriente primaria del transformador

B_1 = Bobina primaria del transformador

V_2 = Voltaje secundario del transformador

I_2 = Corriente secundaria del transformador

B_2 = bobina secundaria del transformador

2.1 Principio de funcionamiento del transformador.

Un transformador está constituido por un núcleo de material magnético, el cual forma un circuito magnético cerrado y sobre cuyas columnas o piernas se localizan dos devanados, uno denominado primario, que toma la energía eléctrica de la alimentación de la corriente alterna y el otro devanado secundario, que recibe la energía por inducción electromagnética el cual alimenta a la carga.

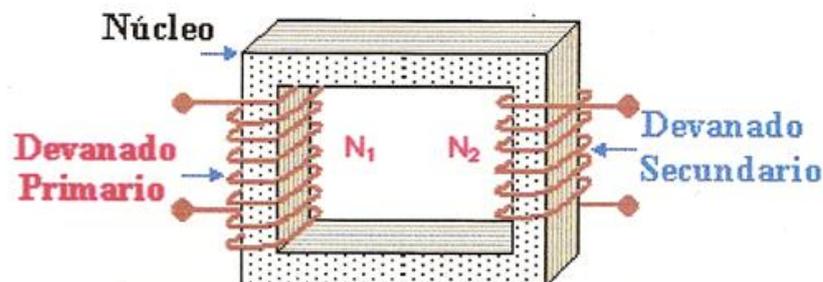


Figura 2.1 Transformador monofásico.

Al conectar el bobinado primario de N_1 espiras, a una tensión alterna senoidal V_1 , aparece una pequeña corriente por dicho bobinado que produce en el núcleo magnético un flujo variable (Φ) también de carácter senoidal. Este flujo variable se cierra por todo el núcleo magnético y corta los conductores del devanado secundario por lo que se induce una fuerza electromotriz en el secundario que dependerá del número de espiras del mismo.

De esta forma, la transferencia de energía eléctrica se hace a través del campo magnético variable que aparece en el núcleo del transformador, no siendo necesario la conexión eléctrica entre ambos bobinados, por lo que se puede decir que un transformador aísla eléctricamente el circuito primario del secundario (la bobina del primario convierte la energía eléctrica en energía en forma de campo magnético variable; la bobina del secundario se comporta

como un generador y transforma dicho campo variable otra vez en energía eléctrica gracias a la inducción electromagnética.

Debido a la elevada permeabilidad del núcleo, la mayor parte del flujo se enlaza con la otra bobina e induce en ella una fem variable en el tiempo (voltaje). La frecuencia de la fem inducida en la otra bobina es la misma que la de la corriente en la primera bobina. Si se conecta la otra bobina a una carga, la fem inducida en la bobina establece en ella una corriente.

Como la fem inducida en una bobina es proporcional al número de vueltas que tiene, es posible que haya un voltaje más elevado a través del devanado secundario que el aplicado al primario. En tal caso se habla de un *transformador elevador*, el cual se usa para conectar una línea de transmisión de voltaje relativamente alto, a un generador de voltaje relativamente bajo. En el caso opuesto, un *transformador reductor*, tiene un voltaje más bajo en el lado secundario. Un ejemplo de un transformador reductor es uno para soldadura, cuyo devanado secundario está diseñado para suministrar una corriente elevada a la carga.

Cuando el voltaje que se aplica al primario es igual a la fem inducida en el secundario, se dice que el transformador tiene una *razón uno a uno*. Un transformador con razón uno a uno se emplea básicamente para aislar en forma eléctrica el lado secundario del primario y se conoce como *transformador de aislamiento*.

2.2 Transformador ideal en vacío.

Suponiendo un circuito magnético:

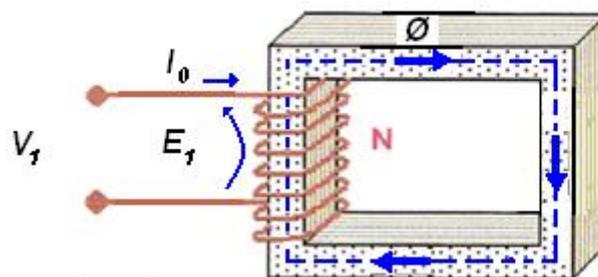


Figura 2.2 F.e.m generada por autoinducción en el devanado primario

Por auto inducción, en cada una de las espiras se crea una fuerza electromotriz (contraelectromotriz):

$$E_{\text{espira}} = \frac{d\Phi}{dt} \quad (2.0)$$

Pero, dado que N es el número de espiras, entonces:

$$E_{\text{total}} = N \frac{d\Phi}{dt} \quad (2.1)$$

Que es la f.e.m total en la bobina.

Si se desprecia la resistencia de la bobina:

$$V_1 + E_1 = 0, \text{ por lo tanto; } V_1 = - E_1$$

Lo que quiere decir que la tensión en los bornes y la f.e.m se compensan, en otras palabras, podemos decir que el flujo magnético Φ en el núcleo induce una f.e.m E_1 en el devanado primario que se opone al voltaje primario V_1 .

Si al núcleo anterior se le enrolla una segunda bobina, se habrá construido un transformador monofásico.

Considérese primero un transformador ideal en el que no hay pérdidas ni flujo de dispersión. Se postula lo siguiente:

- 1.- El núcleo del transformador es sumamente permeable, en el sentido de que requiere una fuerza magnetomotriz (fmm) pequeñísima para establecer el flujo Φ .
- 2.- En el núcleo no se aprecian corrientes parásitas ni pérdidas por histéresis.
- 3.- Todo el flujo está restringido a circular por el núcleo.
- 4.- La resistencia de cada devanado es despreciable.

En la figura 2.3 se muestra un transformador con dos devanados que operan cada uno como parte de un circuito eléctrico diferente. Sean N_1 y N_2 , el número de vueltas en el devanado primario y secundario. El devanado primario está conectado a una fuente de voltaje variable en el tiempo V_1 , mientras que el devanado secundario se dejó abierto.

Con el secundario abierto, al aplicar tensión al primario aparece una corriente de vacío I_0 , de carácter senoidal que al recorrer los conductores de la bobina produce, a su vez un flujo alterno senoidal común a ambos bobinados. Al cortar este flujo a la bobina primaria, se induce una fuerza electromotriz en el primario E_1 , cuyo valor instantáneo dependerá del número de espiras del primario y de lo rápido que varíe el flujo, es decir:

$$E_1 = N_1 \frac{d\phi}{dt} \quad (2.2)$$

En forma semejante la fem inducida en el devanado secundario es:

$$E_2 = N_2 \frac{d\phi}{dt} \quad (2.3)$$

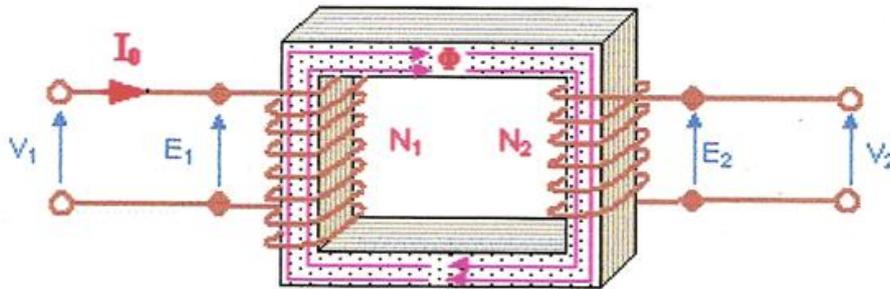


Figura 2.3 Transformador ideal en vacío

IDEAL: Los aislamientos no tienen resistencia y no hay flujo de dispersión.

EN VACÍO: El circuito del secundario está abierto, es decir, sin carga.

De acuerdo a la ley de Lenz, esta fem se opone en todo momento a la causa que la produce, es decir, a la tensión V_1 aplicada al primario, como no hay ningún tipo de pérdidas, los valores instantáneos de V_1 y E_1 son iguales y de signos opuestos.

En el caso ideal supuesto (sin resistencia en el circuito), y con el secundario abierto, es decir, el transformador está en vacío, por lo tanto la corriente secundaria es nula; las fem inducidas E_1 y E_2 son iguales a los voltajes en las terminales V_1 y V_2 , respectivamente.

Como la frecuencia y el flujo son comunes, dividiendo las expresiones de las fuerzas electromotrices (2.2 y 2.3) obtenemos:

$$\frac{E_1}{E_2} = \frac{N_1}{N_2} \quad (2.4)$$

Luego, de las ecuaciones 2.3 y 2.4 se obtiene:

$$\frac{E_1}{E_2} = \frac{N_1}{N_2} = \frac{V_1}{V_2} \quad (2.5)$$

Que establece que *la relación entre las fem inducidas primaria a secundaria es igual a la relación entre el número de vueltas del primario y el secundario.*

Es práctica común definir la relación entre las vueltas del primario al secundario como *relación r, o relación de transformación.* Es decir,

$$\frac{N_1}{N_2} = r \quad (2.6)$$

Partiendo de la expresión general de inducción electromagnética, (ley de Faraday), para una corriente alterna senoidal y tomando en cuenta que el mismo flujo atraviesa tanto al devanado primario como al secundario, la fuerza electromotriz inducida por espira es la misma en ambos:

$$E_1 = 4.44fN_1\varnothing_{max} \quad (2.7)$$

$$E_2 = 4.44fN_2\varnothing_{max} \quad (2.8)$$

Donde:

E_1, E_2 = f.e.m eficaz inducida en el primario y en el secundario (volts).

N_1, N_2 = Número de espiras del primario y del secundario del transformador.

f = Frecuencia (Hz)

\varnothing_{max} = Flujo máximo (Wb)

El diagrama fasorial del transformador ideal en vacío es:

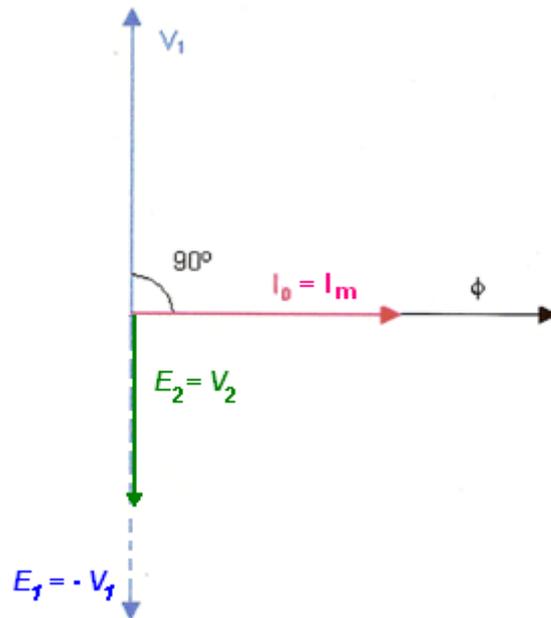


Figura 2.4 Diagrama fasorial del transformador ideal en vacío

A I_0 se le llama corriente primaria de vacío, pero por motivar un flujo magnético sobre el núcleo, se le conoce también como corriente de magnetización, y queda definida como corriente eléctrica que circula en el primario cuando el secundario está abierto.

El arrollamiento primario se comportará como una autoinducción. La corriente en el primario I_0 que es pequeña está retrasada 90° respecto a la tensión del primario.

El flujo del núcleo está en fase con la corriente del primario I_0 .

La potencia que la red entrega al transformador en estas condiciones es:

$$S = V_1 I_0 \quad (2.9)$$

2.3 Transformador ideal con carga.

Al conectar el secundario del transformador a una carga, circulará en el mismo una corriente I_2 como consecuencia de la fem y en el primario una corriente I_1 que no es igual a I_0 . Según la ley de Lenz, la corriente I_2 tiende a debilitar el flujo que circula por el núcleo disminuyendo la f.e.m E_1 y aumentando I_1 hasta que se restablezca el flujo total que circula por el núcleo a su valor inicial, el flujo resultante en el núcleo continua siendo el mismo que con el transformador en vacío y depende exclusivamente de la tensión V_1 aplicada al primario (ver figura 2.5).

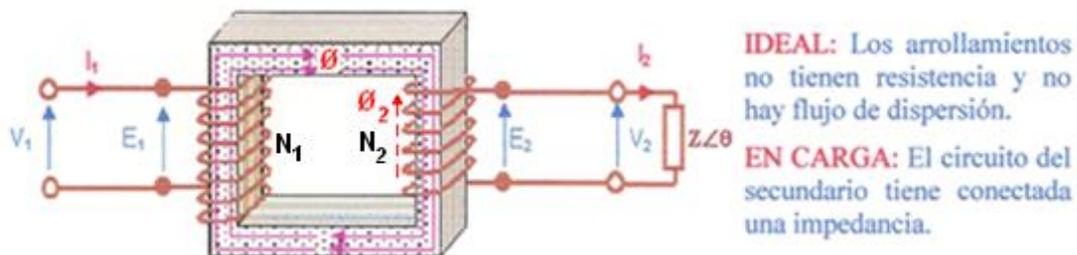


Figura 2.5 Transformador ideal con carga

Como podemos observar en la figura anterior, la I_2 que circula en el secundario, tiene un sentido tal que su flujo magnético asociado Φ_2 se opone a la variación del flujo magnético primario Φ . Para este caso ideal E_1 siempre será igual a V_1 .

Al presentarse I_2 en el secundario, tendremos una potencia eléctrica de salida entregada a la carga que deberá ser tomada de la fuente por el primario del transformador.

Por el principio de conservación de energía y como el transformador es ideal y no tiene pérdidas, la potencia en el primario y en el secundario serán iguales, es decir, existirá la misma potencia a la entrada que a la salida.

Potencia de entrada = Potencia de salida

$$V_1 I_1 = V_2 I_2 \quad (2.10)$$

$$V_1 (I_0 + I_1') = V_2 I_2 \quad (2.11)$$

Se puede observar que I_1 (corriente en el primario cuando el transformador está con carga) es una suma fasorial de dos corrientes, una, I_0 , es la corriente que existe cuando el transformador está en vacío, otra, I_1' , es la corriente que aparece sólo cuando el transformador está en carga y depende, por lo tanto, de dicha carga.

$$\vec{I}_1 = \vec{I}_0 + \vec{I}_1' \quad (2.12)$$

Como la magnitud de I_2 depende del valor de la carga Z_c , ya que el valor de V_2 es prácticamente constante, I_1' debe ser directamente proporcional a I_2 .

Analizando las fuerzas magnetomotrices, F_{mm} o F , que se producen en el transformador, vemos que en vacío la única F_{mm} existente es:

$$F_0 = N_1 I_0 \quad (2.13)$$

Que crea el flujo ϕ . En condiciones de carga, en el secundario se produce una F_{mm} que impulsa el flujo ϕ_2 de sentido contrario a ϕ , esto es:

$$F_2 = N_2 I_2 \quad (2.14)$$

En el primario aparece otra corriente, I_1' , que debe producir otra F_{mm} :

$$F_1' = N_1 I_1' \quad (2.15)$$

y por lo tanto otro flujo ϕ_1' .

El flujo ϕ originado por F_0 es suficiente para hacer aparecer el voltaje V_2 en las terminales del secundario estando el transformador en vacío. Cuando la carga es conectada al secundario del transformador, el V_2 permanece constante (para este caso del transformador ideal) y por lo tanto podemos decir que es producido por el mismo flujo ϕ , en función de la relación $V_2 = -N_2 \frac{d\phi}{dt}$; por lo que se puede deducir que las F_{mm} F_1' y F_2 son iguales y de sentidos opuestos anulándose sus efectos entre sí.

Esto es, el flujo ϕ seguirá fluctuando senoidalmente y con amplitud constante sin que aparezca ningún flujo opositor a su variación, considerando lo anterior en un diagrama de bloques:

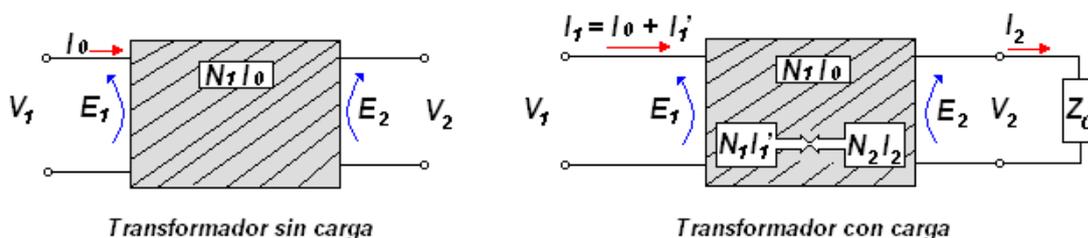


Figura 2.6 Diagrama de bloques de las fluctuaciones de ϕ , ϕ_1 y ϕ_2 en el transformador con y sin carga

Tenemos entonces que:

$$N_1 I_1' = N_2 I_2 \quad (2.16)$$

Y sabemos que: $I_1 = I_{\text{magnetización}} + I_{\text{adicional debida a la carga}}$

$$\text{Fasorialmente: } I_1 = I_m + I_1' \quad (2.17)$$

En nuestras condiciones ideales la corriente de magnetización I_m representa un pequeño valor respecto a la alta permeabilidad del núcleo basta con un mínimo valor de I_m para que el flujo \emptyset llegue al secundario.

Podemos despreciar a I_0 (I_m) por lo que $I_1 = I_1'$, entonces la ecuación 2.16 quedará:

$$N_1 I_1 = N_2 I_2 \quad (2.18)$$

Por lo que podemos establecer que:

$$\frac{N_1}{N_2} = \frac{I_2}{I_1} = \frac{V_1}{V_2} = r_1 \quad (2.19)$$

Donde r_1 es la relación de transformación del transformador ideal con carga, considerando lo anterior el diagrama fasorial para un transformador ideal con carga sería:

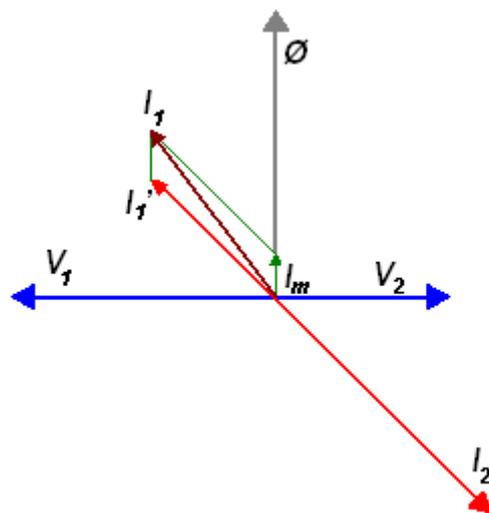


Figura 2.7 Diagrama fasorial de un transformador ideal con carga considerando a I_m .

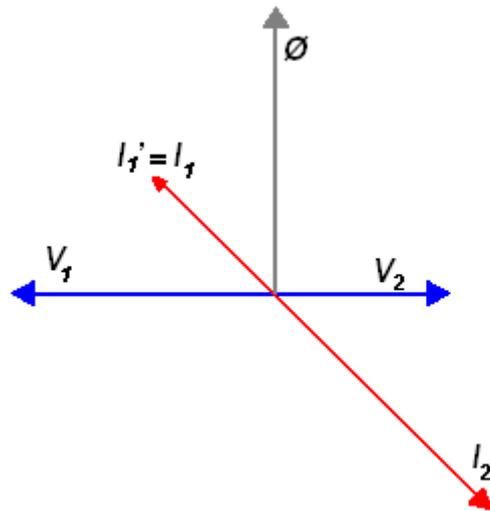


Figura 2.8 Diagrama fasorial de un transformador ideal con carga despreciando I_m .

En estos diagramas fasoriales, la relación de transformación en los transformadores es $r_1 = 2/1$.

De acuerdo con estos supuestos, la fmm de la corriente primaria $N_1 I_1$ debe ser igual y opuesta a la fmm $N_2 I_2$.

Por lo tanto, las potencias activas (P), reactivas (Q) y aparentes (S) absorbidas por el primario son iguales que las suministradas por el secundario. Para una determinada potencia aparente, si crece la tensión, disminuye la intensidad de corriente y viceversa.

$$P = V_1 I_1 \cos \theta_1 = V_2 I_2 \cos \theta_2 \quad (2.20)$$

$$Q = V_1 I_1 \sin \theta_1 = V_2 I_2 \sin \theta_2 \quad (2.21)$$

$$S = V_1 I_1 = V_2 I_2 \quad (2.22)$$

2.4 Transformador real.

Todo devanado presenta alguna resistencia sin importar cuán pequeña pueda ser. No obstante es posible reemplazar un transformador real por otro ideal agregando una resistencia en serie con cada devanado, igual a la resistencia de éste. La inclusión de resistencias de los devanados define que:

- a) La potencia de entrada debe ser mayor a la potencia de salida.
- b) El voltaje entre terminales no es igual a la fem inducida.
- c) La eficiencia de un transformador real es menor que 100%.

No todo el flujo que crea el devanado se confina en el núcleo magnético en el que está devanado, una parte conocida como *flujo de dispersión*, sigue su camino a través del aire. Por tanto cuando ambos devanados de un transformador conducen corrientes, cada uno crea su propio flujo de dispersión.

Aunque el flujo de dispersión es una pequeña fracción del flujo total que crea un devanado, afecta el rendimiento el transformador.

El flujo de dispersión asociado con cualquier devanado es responsable de la caída de voltaje a través de él. Por lo tanto, es posible representar la caída de voltaje debida al flujo de dispersión con una *reactancia de dispersión*.

A diferencia del transformador ideal, el transformador real presenta una serie de pérdidas de potencia las cuales podemos dividir en dos categorías:

1.- *Pérdidas en vacío*.- Son las que se producen en el circuito magnético a causa de la histéresis y por corrientes parásitas o de Foucault, por lo que son esencialmente *pérdidas en el hierro*. Provocan pérdidas de potencia que se suman a las de Joule. Aunque estas últimas pueden despreciarse ya que la corriente de vacío (en el devanado primario), es muy pequeña.

2.- *Pérdidas debido a la carga*.- Se producen en los circuitos eléctricos primario y secundario del transformador se denominan también *pérdidas en el cobre*, las cuales son provocadas por:

- a) Dispersión del flujo en los devanados primario y secundario: Estas pérdidas tienen un valor equivalente a las provocadas por dos reactancias inductivas X_{d1} , y X_{d2} en serie con los devanados.
- b) Resistencia de los devanados: Provocan pérdidas por efecto joule y caídas de tensión. Equivalen a dos resistencias en serie con el circuito.

Estas pérdidas se representan por medio de la ecuación:

$$P_{cu} = I_1^2 R_1 + I_2^2 R_2 \quad (2.23)$$

Por lo tanto son directamente proporcionales a la corriente de carga.

Durante el funcionamiento en carga del transformador aparecen simultáneamente las “pérdidas de vacío” y las “pérdidas debidas a la carga” de tal forma que las pérdidas totales valen:

$$P_T = P_{Fe} + P_{cu} \quad (2.24)$$

De ellas, las “pérdidas en el hierro” son fijas e independientes de la carga y las “pérdidas en el cobre” son variables y dependen de la carga.

2.5 Transformador real en vacío.

En el transformador real los arrollamientos tienen cierta resistencia, que al paso de la corriente provoca una caída de tensión que ha de tenerse en cuenta y, además, el flujo Φ_1 originado por el primario no se cierra totalmente por el circuito magnético del núcleo abarcando ambas bobinas, la primaria y la secundaria sino que una parte de este flujo, atravesando los aislantes, se cierra por el aire (dispersión) y no concatena ambas bobinas, así, el flujo total creado por el primario, se divide en dos, el flujo Φ común al primario y al secundario y el flujo de dispersión Φ_{d1} :

Por lo tanto:
$$\Phi_1 = \Phi + \Phi_{d1} \quad (2.25)$$

Este flujo de dispersión produce el efecto de una reactancia provocando una caída de tensión. Como puede verse en la figura siguiente, son dos flujos en paralelo que se pueden sustituir por dos bobinas en serie, una de ellas será la del arrollamiento primario y la otra tendrá una reactancia X_{d1} que produce una caída de tensión equivalente al efecto de la pérdida del flujo por dispersión

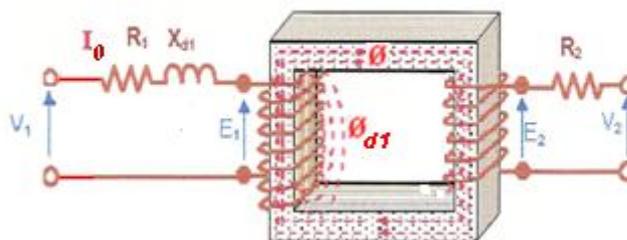


Figura 2.9 Transformador real en vacío

Esta figura nos muestra el esquema equivalente del transformador real, donde se muestran las resistencias y los flujos que actúan con el transformador en vacío.

En el transformador ideal se tiene que:
$$V_1 + E_1 = 0$$

En el transformador real sucede que:

$$V_1 - E_1 = \Sigma \text{ caídas de tensión} \quad (2.26)$$

Por lo tanto:

$$V_1 = E_1 + R_1 I_0 + jX_{d1} I_0 \quad (2.27)$$

Al conectar el primario a una tensión de red V_1 aparece una corriente de vacío I_0 que es la encargada de producir el flujo magnético común del transformador. Esta corriente de vacío está formada por dos componentes:

- La componente magnetizante (I_m): que es la parte de la corriente de vacío que genera el flujo, y está en fase con Φ .
- La componente de pérdidas (I_{Fe}): Toma en consideración las pérdidas por histéresis y corrientes de Foucault (corrientes parásitas) en el núcleo y está en fase con V_1 . Esta corriente multiplicada por V_1 da la potencia de pérdidas en el hierro.

Los valores de estas corrientes están expresados por:

$$I_m = I_0 \text{sen } \varphi \quad (\text{componente reactiva de } I_0) \quad (2.28)$$

$$I_{Fe} = I_0 \text{cos } \varphi \quad (\text{componente activa de } I_0) \quad (2.29)$$

A diferencia del transformador ideal, la corriente de vacío I_0 no está desfasada 90° con respecto a V_1 sino un ángulo ligeramente menor de 90° (φ). Ahora I_0 no está en fase con Φ sino que lo adelantará θ° .

Podemos representar ahora el diagrama fasorial del transformador real en vacío:

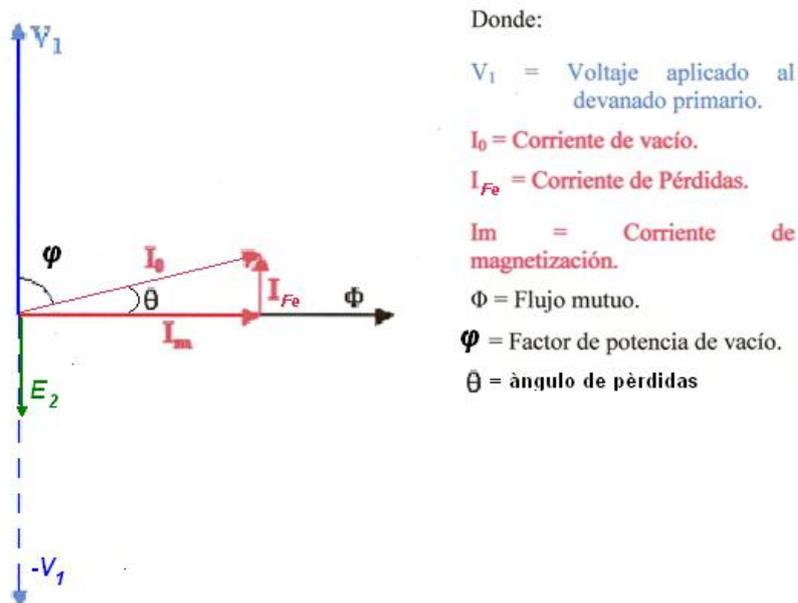


Figura 2.10 Diagrama fasorial del transformador real en vacío.

La potencia absorbida en vacío tiene un cierto valor:

$$P_0 = V_1 I_0 \cos \varphi \quad (2.30)$$

Que cubre las pérdidas de potencia del transformador en vacío, es decir, las pérdidas en el hierro.

En el diagrama fasorial anterior no consideramos las caídas de tensión $I_0 R_1$ y $I_0 X_{d1}$, tomando en cuenta que I_0 es demasiado pequeña (de 1% a 5% de la I_1 a plena carga) y que las pérdidas que se presentan en transformador real en vacío son las pérdidas en el hierro, el diagrama fue trazado para una relación $r = 2/1$.

2.6 Transformador real con carga.

Cuando se energiza el primario del transformador y el secundario se encuentra en vacío aparece una fem E_2 en las terminales del secundario; en el momento en que se aplica una carga en el secundario, el voltaje en el secundario ira variando de acuerdo con las características de la carga y la impedancia propia del transformador.

En un transformador real, la tensión producida en el secundario disminuye al aumentar la carga; es decir, la intensidad que entrega (si aumenta la intensidad de carga es por que ha disminuido la impedancia de la carga).

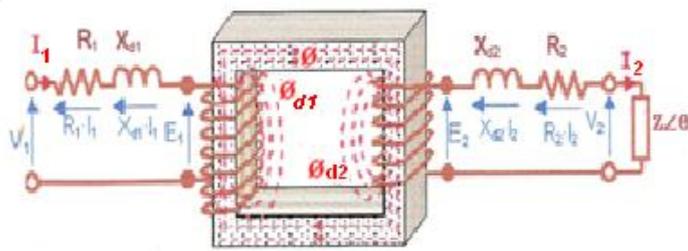
En un principio, estando el transformador en vacío, sólo circula por el primario la corriente I_0 ; cuando se conecta carga y aparece I_2 en el secundario, en el primario circulará I_1 , que como ya sabemos, es igual a :

$$I_1 = I_0 + I'_1$$

Al aumentar I_2 con la carga, la corriente del primario I_1 también aumenta y con ellas las caídas de tensión en las resistencias (R) e inductancias (X_d) del primario y del secundario.

En el transformador real el flujo circula no solo por el núcleo ferromagnético; hay una parte que se dispersa en el aire atravesando solo a la bobina que lo produce y que provoca una fem en la misma. El resultado de esta dispersión de flujo se puede representar en el esquema equivalente mediante las reactancias X_{d1} y X_{d2} .

Ahora, funcionando el transformador con carga, circula I_2 , y se produce un flujo de dispersión en el secundario ϕ_{d2} . Se puede sustituir el efecto del flujo de dispersión del secundario ϕ_{d2} , por una reactancia ideal X_{d2} . En estas condiciones, el esquema equivalente del transformador real con carga es:



Del circuito anterior, por aplicación de las leyes de Kirchoff al primario y al secundario, se deducen las siguientes ecuaciones vectoriales de tensiones:

$$\vec{V}_1 = \vec{R}_1 I_1 + \vec{X}_{d1} I_1 + \vec{E}_1$$

$$\vec{E}_2 = \vec{R}_2 I_2 + \vec{X}_{d2} I_2 + \vec{V}_2$$

Figura 2.11 Transformador real con carga

Al conectar la carga en el secundario aparece una fmm $N_2 I_2$ que cambia el valor del flujo común (aumenta o disminuye según el sentido de I_2), esa variación del flujo hace que la fem E_1 varíe también:

$$E_1 = N_1 \frac{d\Phi}{dt}$$

Como en el primario V_1 es constante, al variar E_1 , aparece una corriente I_1 que provoca otra fuerza contraelectromotriz que compensa a la del secundario: $N_1 I_0 = N_1 I_1 + N_2 I_2$.

A plena carga I_0 es despreciable comparada con I_1 e I_2 , por lo que podemos considerar que: $N_1 I_1 = N_2 I_2$, por lo tanto:

$$r = \frac{N_1}{N_2} = \frac{I_2}{I_1}$$

Del esquema 2.11 podemos deducir las siguientes ecuaciones:

En el primario:

$$V_1 = E_1 + I_1 R_1 + I_1 (jX_{d1})$$

$$V_1 = E_1 + I_1 (R_1 + jX_{d1}) \quad (2.31)$$

En el secundario:

$$V_2 = E_2 - I_2 R_2 - I_2 (jX_{d2})$$

$$V_2 = E_2 - I_2 (R_2 + jX_{d2}) \quad (2.32)$$

Que son las ecuaciones de los voltajes del transformador real con carga.

Las ecuaciones 2.31 y 2.32 nos permiten trazar el diagrama fasorial del transformador real con carga:

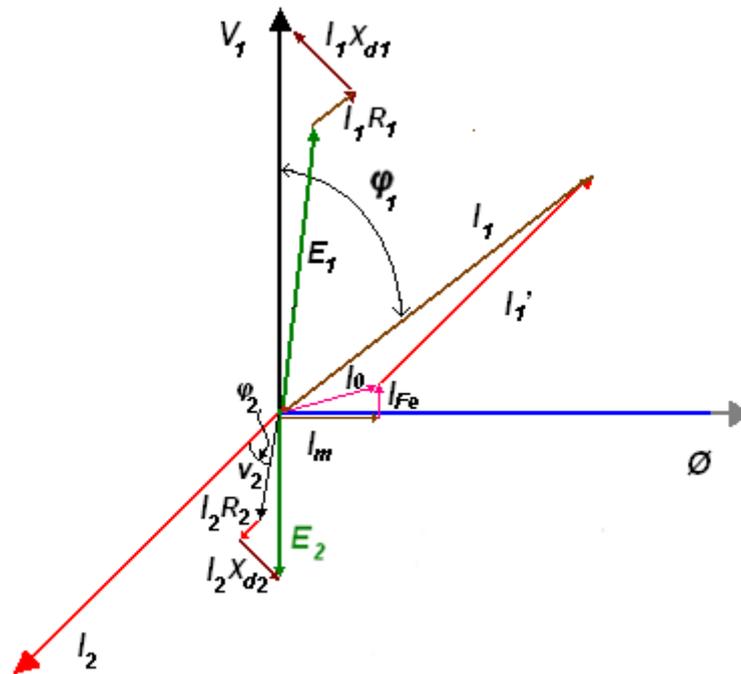


Figura 2.12 Diagrama fasorial del transformador real con carga

2.7 Diagramas fasoriales del transformador real.

Conocidos o medidos, los valores de tensión, corriente de la carga, su desfase, su relación de transformación, sus resistencias y sus reactancias ($V_2, I_2, \phi_2, R_1, X_{d1}, R_2, X_{d2}$), podemos construir los diagramas vectoriales a partir de las ecuaciones vectoriales. Tomamos como referencia las intensidades, teniendo en cuenta que las caídas de tensión en las resistencias están en fase con ellas y las caídas en las reactancias a 90° en adelante.

Diagrama fasorial del secundario

Se construye a partir de los datos de la carga en módulo y ángulo, sumando vectorialmente las caídas de tensión en la resistencia y en la reactancia del secundario, a 0° y a 90° de la intensidad respectivamente, para calcular el módulo y el ángulo de la f.e.m. del secundario.

$$\vec{E}_2 = \vec{R}_2 I_2 + \vec{X}_{d2} I_2 + \vec{V}_2 \quad (2.33)$$

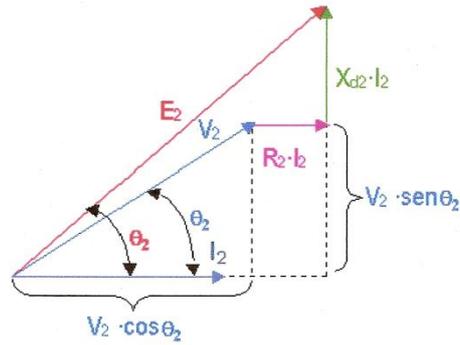


Figura 2.13 Diagrama fasorial del secundario

Diagrama fasorial del primario

$$\vec{V}_1 = \vec{R}_1 I_1 + \vec{X}_{d1} I_1 + \vec{E}_1 \quad (2.34)$$

Se construye a partir de la f.e.m y de la intensidad del primario con su desfase, sumando vectorialmente las caídas de tensión en la resistencia y en la reactancia del primario, a 0° y a 90° de la intensidad respectivamente, para calcular la tensión del primario en módulo y ángulo.

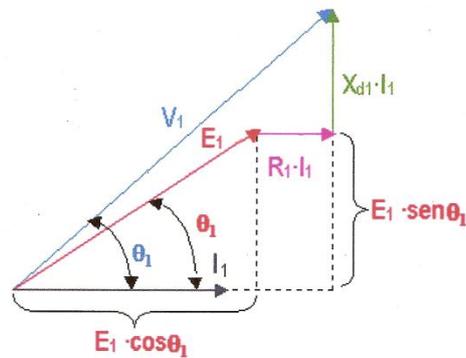


Figura 2.14 Diagrama fasorial del secundario

Paso del diagrama fasorial del secundario al primario.

Suelen ser conocidos los datos de carga, así como las resistencias y reactancias del transformador, con lo que es posible construir el diagrama fasorial del primario, necesitamos conocer E_1 , I_1 y el ángulo que forman θ_1 .

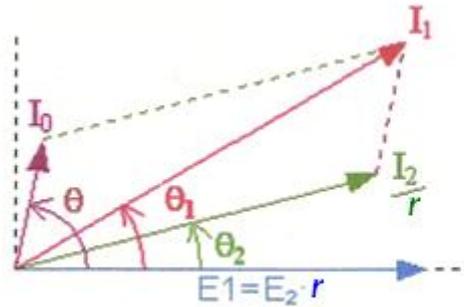


Figura 2.15 Diagrama fasorial del secundario al primario

Referencia del secundario al primario.

En los sistemas eléctricos con varias tensiones de servicio, se emplea mucho la referencia de todas las tensiones a una sola tensión considerada como básica; los cálculos se realizan entonces como si se tratara de un sólo circuito con una tensión de servicio común.

En la teoría de los transformadores se acostumbra a referir los valores de las corrientes y tensiones del secundario a los correspondientes valores del primario con lo que se simplifican los razonamientos y los cálculos para determinar las condiciones de servicio.

Supongamos que un transformador de 11 000 V / 220 V, es decir una relación de transformación 50/1.

Para trazar el diagrama fasorial deberán cumplirse las siguientes relaciones:

$$\frac{V_1}{V_2} = r = \frac{50}{1} ; \quad \frac{I_1}{I_2} = \frac{1}{r} = \frac{1}{50}$$

Es decir, que si se elige una escala para el trazado de los fasores representativos de V_1 e I_1 , el fasor representativo de V_2 será muy pequeño (50 veces menor que V_1), mientras que el fasor representativo de I_2 será muy grande (50 veces mayor que I_1). Para evitar estos inconvenientes que afectan al trazado y a la precisión de los valores medidos, se recurre a las siguientes soluciones:

- a) Los valores representativos de los voltajes secundarios se multiplican por r . Los nuevos valores se representan en los diagramas fasoriales.

$$E'_1 = r E_2 \quad (\text{Fem secundaria referida al primario}) \quad (2.35)$$

$$V'_1 = r V_2 \quad (\text{Tensión secundaria referida al primario}) \quad (2.36)$$

$$V'_{R2} = r V_{R2} \text{ (Caída de tensión en la } R_2 \text{ del secundario referida al primario)} \quad (2.36)$$

$$V'_{X_{d2}} = r V_{X_{d2}} \text{ (Caída de tensión en la } X_{d2} \text{ del secundario referida al primario)} \quad (2.37)$$

De esta manera, se obtienen valores para las tensiones y Fem secundarias cuyas magnitudes son parecidas a los valores correspondientes del primario, por lo que no hay inconvenientes para elegir la escala.

- b) Los valores representativos de las corrientes secundarias se multiplican por $1/r$, es decir:

$$I'_2 = I_2 \left(\frac{1}{r} \right) \text{ (corriente secundaria referida al primario)} \quad (2.38)$$

- c) Las impedancias, resistencias y reactancias del secundario se refieren al primario multiplicándolos por el cuadrado de r .

$$Z'_c = \frac{V'_2}{I'_2} = \frac{r V_2}{\frac{1}{r} I_2} = r^2 Z_c \text{ (impedancia de la carga del secundario referida al primario)} \quad (2.39)$$

$$R'_2 = r^2 R_2 \text{ (resistencia del secundario referida al primario)} \quad (2.40)$$

$$X'_{d2} = r^2 X_{d2} \text{ (reactancia de dispersión del secundario referida al primario)} \quad (2.41)$$

- d) Las potencias del secundario y los ángulos de fase no se alteran al referirlos al primario, como es fácil comprobar, quedando inalterados los valores de las potencias activas, reactivas y aparentes, en efecto:

$$\text{Activa: } V'_2 I'_2 \cos \varphi_2 = (r V_2) \left(\frac{1}{r} I_2 \right) \cos \varphi_2 = V_2 I_2 \cos \varphi_2 \quad (2.42)$$

$$\text{Reactiva: } V'_2 I'_2 \sin \varphi_2 = (r V_2) \left(\frac{1}{r} I_2 \right) \sin \varphi_2 = V_2 I_2 \sin \varphi_2 \quad (2.43)$$

$$\text{Aparente: } V'_2 I'_2 = (r V_2) \left(\frac{1}{r} I_2 \right) = V_2 I_2 \quad (2.44)$$

En resumen, se puede decir que la operación de referir el secundario al primario equivale a reducir un transformador con una relación de transformación r dada a otro transformador cuya $r = 1/1$.

El diagrama fasorial con los valores del secundario referidos al primario se expresan en la figura 2.16(a), sin embargo, la forma más práctica y cómoda de dibujar el diagrama fasorial está en la figura 2.16(b), es decir, girando 180° todos los fasores del secundario. La figura (b) nos permite escribir la siguiente relación de voltajes para el transformador real con carga:

$$V_1 = V'_2 + R'_2 I'_2 + jX'_{d2} I'_2 + R_1 I_1 + jX_{d1} I_1 \quad (2.45)$$

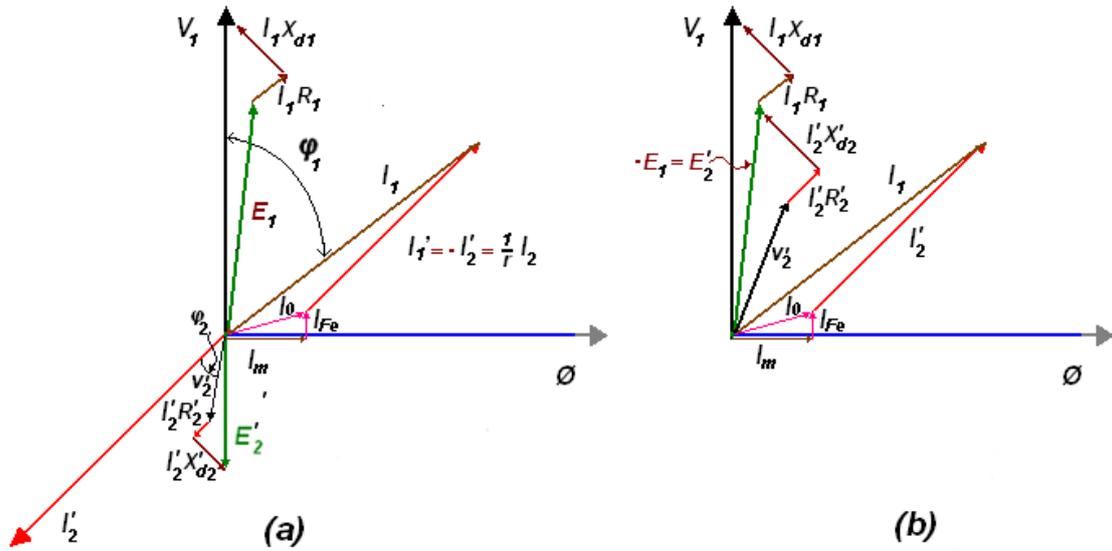


Figura 2.16 Diagrama fasorial con los valores del secundario referidos al primario.

2.8 Circuito equivalente exacto del transformador real.

Supongamos un transformador con el secundario referido al primario:

$$rN_2 = N_2' \quad (2.46)$$

Por lo tanto:

$$\frac{N_1}{N_2} N_2 = N_2' = N_1 \quad (2.47)$$

Por lo que se cumplirá también que:

$$rE_2 = E_2' \quad (2.48)$$

$$\frac{E_1}{E_2} E_2 = E_2' = E_1 \quad (2.49)$$

El esquema de un transformador semejante está representado en la siguiente figura:

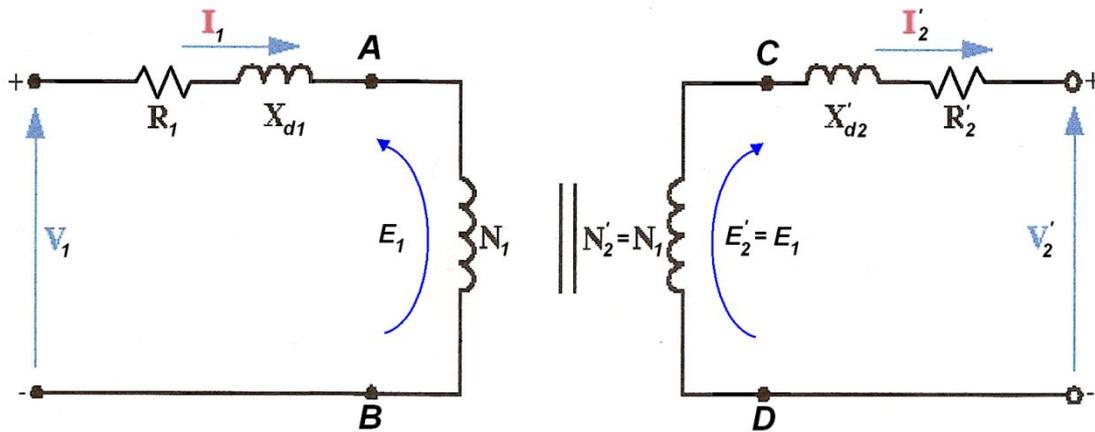


Figura 2.17 Circuito equivalente del transformador real.

En este esquema se pueden unir sin inconvenientes los puntos A y C ya que son puntos de dos circuitos eléctricos diferentes sometidos a la misma tensión en los puntos B y D y por lo tanto, también pueden unirse entre sí, sin provocar ninguna alteración en los regímenes de corrientes y tensiones.

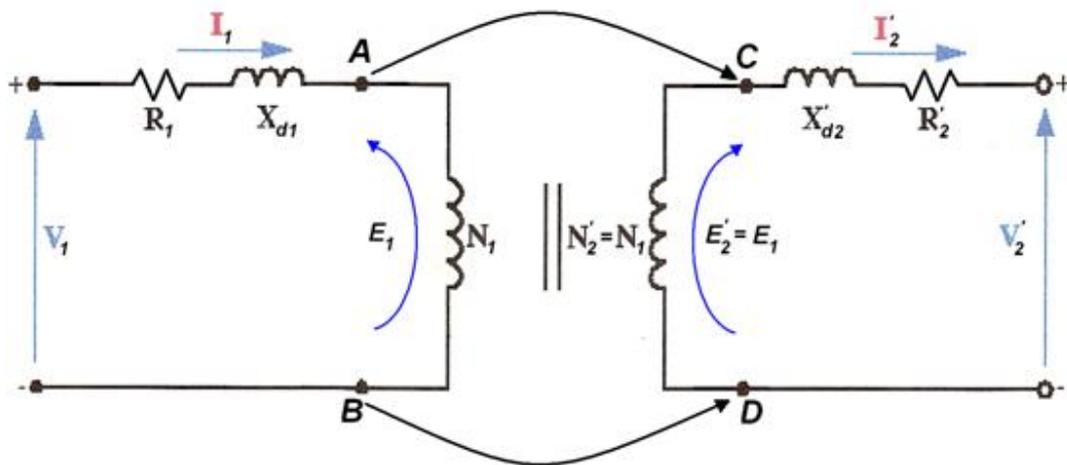


Figura 2.18 Circuito equivalente del transformador real uniendo los puntos AC y BD

Al estar unidos estos dos puntos una de las bobinas resulta (superflua), por lo que pueden eliminarse.

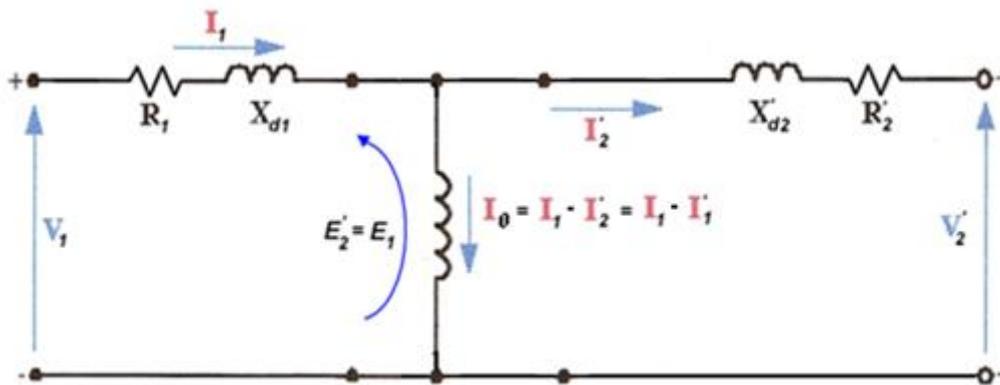


Figura 2.19 circuito equivalente del transformador real eliminando una bobina.

Ahora bien, por la única bobina que queda en el circuito pasa la corriente de vacío:

$$I_0 = I_1 - I'_2 \quad (\text{corriente de vacío o corriente de excitación}) \quad (2.50)$$

Por otra parte, sabemos que la I_0 tiene dos componentes: I_m e I_{Fe} .

Se puede sustituir entonces la bobina anterior por dos ramas en paralelo recorridas respectivamente por la I_m , reactiva pura, es decir desfasada 90° en atraso respecto a la Fem E_1 ; y por la I_{Fe} que es óhmica, o sea que está en fase con dicha Fem E_1 . El circuito equivalente del transformador es por lo tanto:

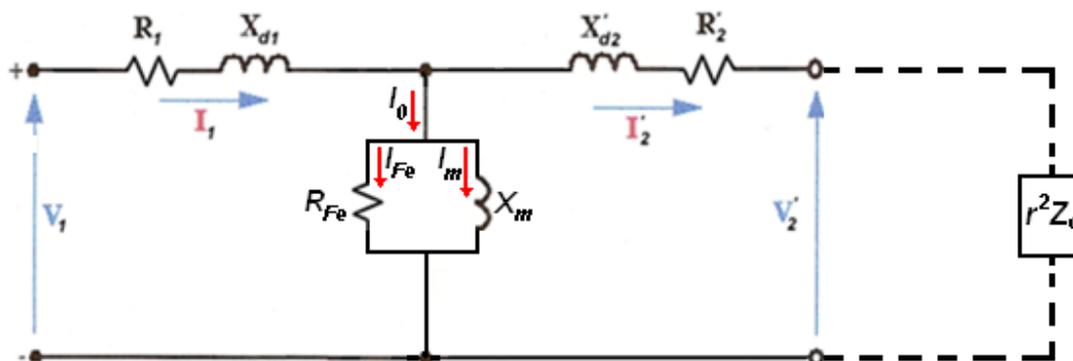


Figura 2.20 circuito equivalente a las pérdidas en un transformador real.

Donde:

$I_0 = I_e =$ corriente de vacío o de excitación, que es por definición aquella corriente que circula por un transformador real con un núcleo de hierro cuando el embobinado secundario está abierto y se aplica al primario un voltaje nominal.

$I_m =$ corriente de magnetización

I_{Fe} = corriente que compensa las pérdidas en el núcleo

X_m = reactancia de magnetización

R_{Fe} = resistencia equivalente a las pérdidas en el núcleo

Es necesario aclarar que el circuito anterior no es el circuito de un transformador real sino el circuito que equivale a las pérdidas que se presentan en un transformador real.

2.9 Circuito equivalente aproximado del transformador real.

En muchas ocasiones se hace una simplificación del “circuito equivalente exacto” anterior para facilitar el análisis de un transformador, sacrificando alguna exactitud, aunque no mucha, pero que nos proporciona rapidez de cálculo.

La caída de voltaje motivada por la I_1 al circular sobre $(R_1 + jX_{d1})$, se puede considerar despreciable comparada con el voltaje V_1 . Por ello, para no despreciarla completamente, podemos desplazar esta impedancia $(R_1 + jX_{d1})$ hacia el secundario y obtendremos un nuevo diagrama que llamaremos: “circuito equivalente aproximado referido al primario”.

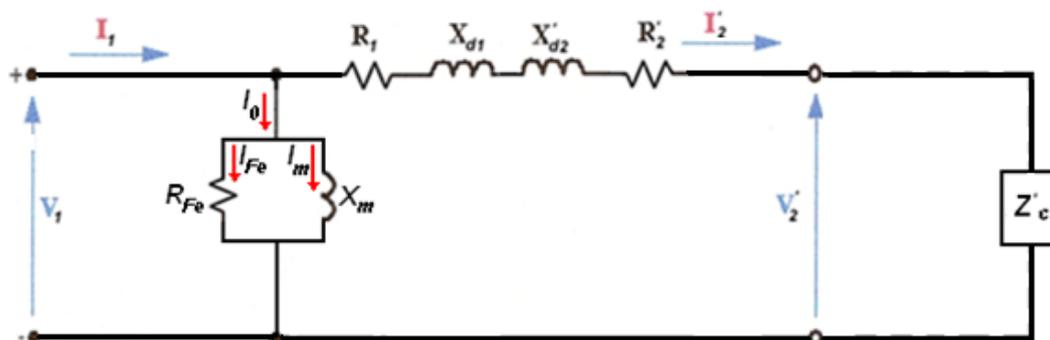


Figura 2.21 Circuito equivalente aproximado referido al primario con la impedancia desplazada hacia el lado secundario

Pudiendo reducirse a:

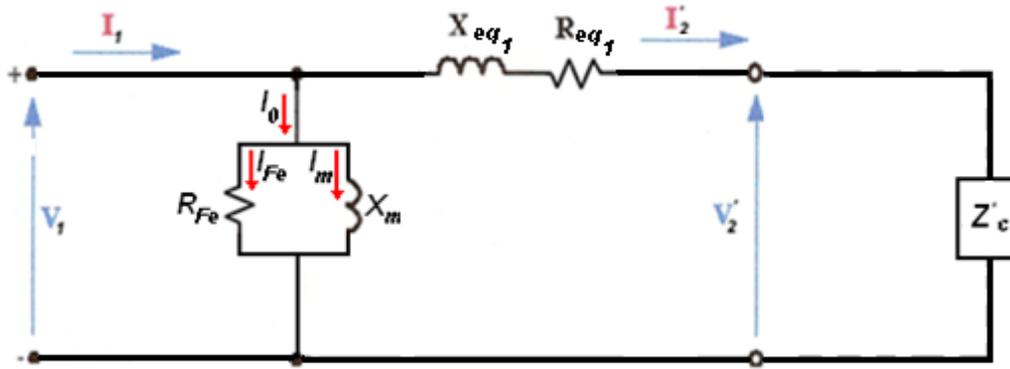


Figura 2.22 Circuito equivalente aproximado referido al lado primario.

Donde:

X_{eq1} = reactancia equivalente del transformador referida al primario.

$$X_{eq1} = X_{d1} + X'_{d2} = X_{d1} + r^2 X_{d2} \quad (2.51)$$

R_{eq1} = resistencia equivalente del transformador referida al primario.

$$R_{eq1} = R_1 + R'_2 = R_1 + r^2 R_2 \quad (2.52)$$

Usando todo lo visto hasta este momento, podemos representar todos los parámetros como si se observara desde el lado secundario quedando un circuito como se muestra en la siguiente figura:

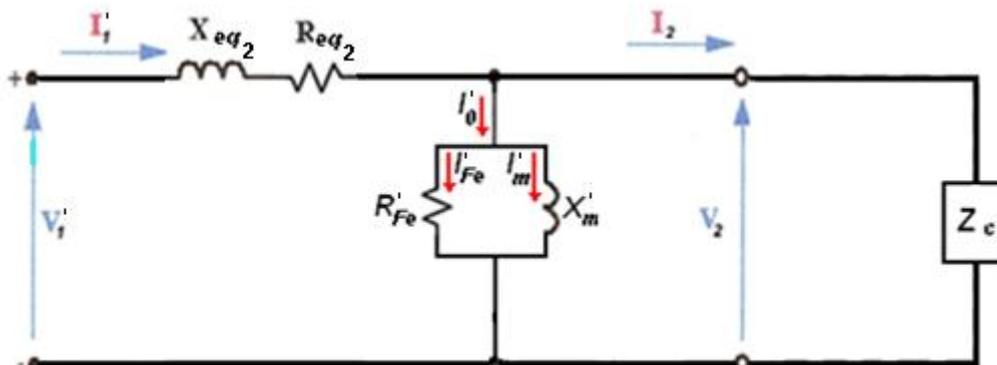


Figura 2.23 Circuito equivalente aproximado referido al secundario

Donde:

$$V'_1 = \text{Voltaje del primario referido al secundario} = \frac{1}{r} V_1 \quad (2.53)$$

$$I'_1 = \text{Corriente del primario referida al secundario} = r I_1 \quad (2.54)$$

$$R_{eq2} = \text{Resistencia equivalente del transformador referida al secundario} = R'_1 + R_2$$

$$= \frac{1}{r^2} R_1 + R_2 \quad (2.55)$$

$$X_{eq2} = \text{Reactancia equivalente del transformador referida al secundario} = X'_1 + X_2$$

$$= \frac{1}{r^2} X_1 + X_2 \quad (2.56)$$

$$I'_0 = \text{Corriente de vacío referida al secundario} = rI_0 \quad (2.57)$$

$$I'_{Fe} = \text{Corriente de pérdidas en el núcleo referida al secundario} = rI_{Fe} \quad (2.58)$$

$$I'_m = \text{Corriente de magnetización referida al secundario} = rI_m \quad (2.59)$$

2.10 Circuito equivalente simplificado.

A menudo, como cuando se analizan transformadores en sistemas de potencia, el circuito equivalente del transformador se simplifica al máximo despreciándose la I_0 por ser su valor muy pequeño con respecto I_1 , con lo que queda:

$$I_1 \approx I'_2 \quad (2.60)$$

Y el diagrama:

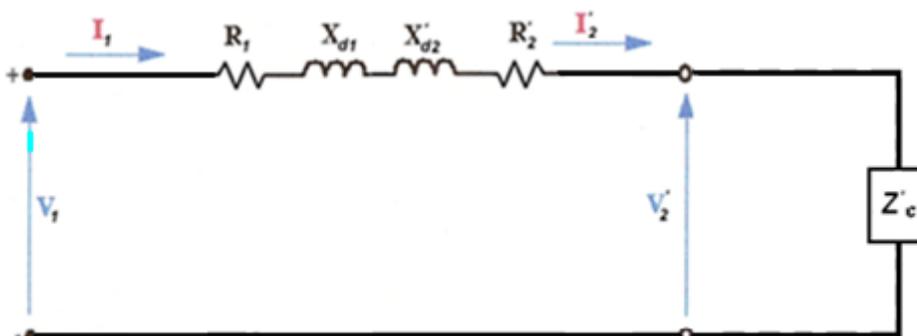


Figura 2.23 Circuito equivalente simplificado del transformador.

Agrupando los elementos, el circuito nos queda como indica la siguiente figura:

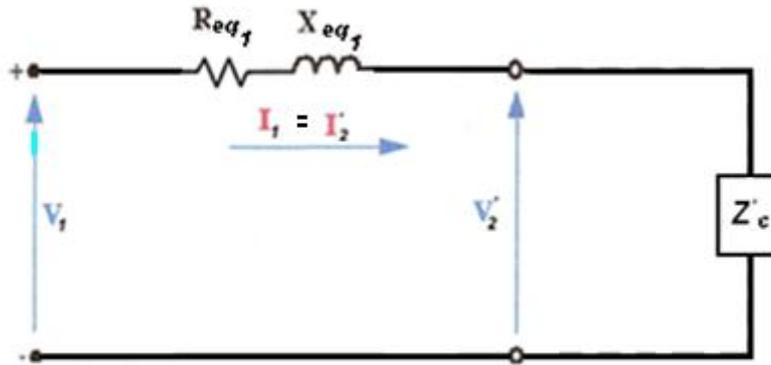


Figura 2.23 Circuito equivalente simplificado del transformador referido al primario.

Del diagrama vemos que la corriente de carga está limitada únicamente por los valores de R_{eq1} y X_{eq1} , y por esta razón se les denomina: “resistencia de corto circuito” (R_{cc}) y “reactancia de corto circuito” (X_{cc}).

Serán los elementos que limitaran la corriente (de corto circuito) en el transformador cuando ocurra una falla por corto circuito en la carga del secundario.

Por lo tanto:

$$X_{eq1} = X_{cc} = X_{d1} + X'_{d2} = X_{d1} + r^2 X_{d2} \quad (2.61)$$

$$R_{eq1} = R_{cc} = R_{d1} + R'_{d2} = R_{d1} + r^2 R_{d2} \quad (2.62)$$

Podemos definir, por lo tanto, una impedancia de corto-circuito (Z_{cc}):

$$Z_{cc} = \sqrt{R_{cc}^2 + X_{cc}^2} \quad (2.63)$$

Con estas simplificaciones, el diagrama fasorial correspondiente sería:

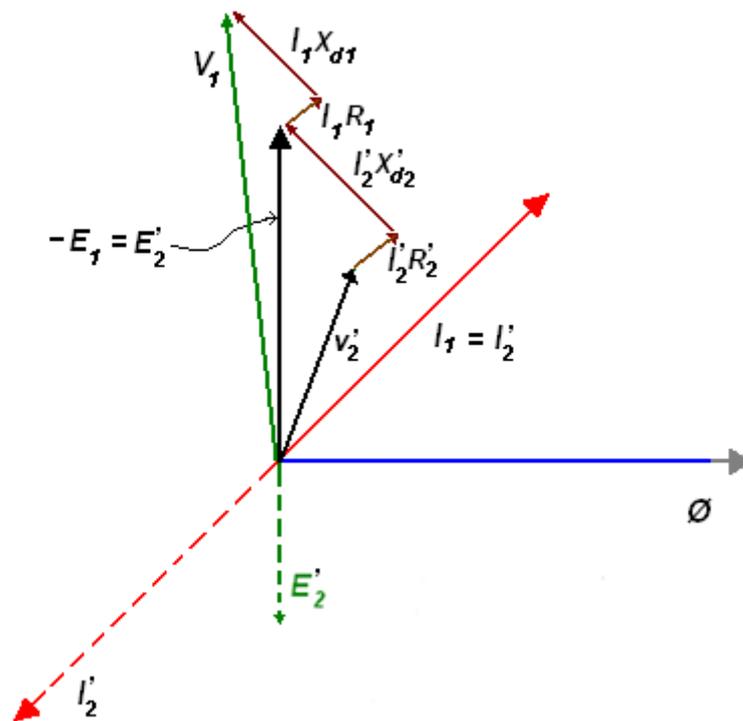


Figura 2.24 Diagrama fasorial simplificado con los valores del secundario referidos al primario.

2.11 Determinación de las constantes del transformador.

Las magnitudes de las resistencias y reactancias de los devanados de un transformador pueden determinarse experimentalmente, así como las pérdidas eléctricas (en el cobre) y magnéticas (en el núcleo) del mismo. Una buena aproximación de dichas magnitudes se logra con solo dos pruebas: El ensayo en circuito abierto y el ensayo en corto circuito.

Prueba de circuito abierto o ensayo en vacío.

Esta prueba tiene como objetivo determinar las pérdidas magnéticas en el en el núcleo del (P_n) transformador de una manera cómoda y precisa, independientemente de poder determinar también los valores de I_{Fe} , I_m , I_e , R_{Fe} , X_m y r . En esta prueba se deja el arrollamiento secundario del transformador en circuito abierto, es decir, sin carga alguna conectada, mientras le es aplicado al primario el voltaje nominal.

Según el circuito equivalente aproximado referido al primario, se reduce a:

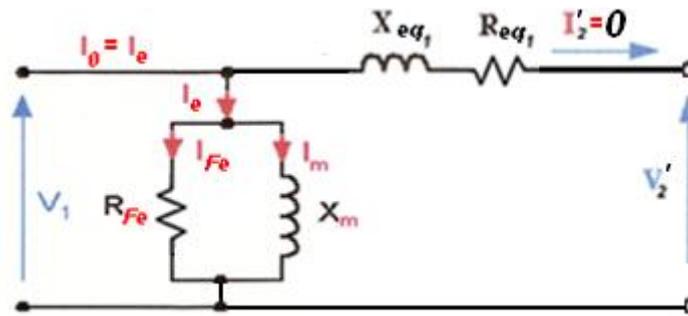


Figura 2.25 Circuito equivalente aproximado referido al primario en el ensayo de vacío.

La única corriente que circula es la de vacío o de excitación. Como las pérdidas en el núcleo (P_n) dependen del flujo y la frecuencia, será necesario que la prueba se realice a frecuencia nominal y a voltaje nominal.

Esta prueba se hace, por lo general, en baja tensión, por que:

- Es fácil el suministro de voltaje
- Existe mayor seguridad personal para el operador
- Se usan instrumentos de medición relativamente económicos, ya que se trabaja con corriente pequeña (I_0) y voltaje de baja tensión.

La conexión del circuito para la prueba es como sigue:

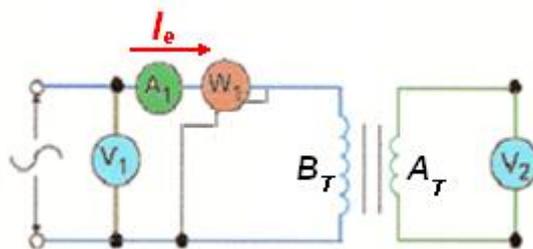


Figura 2.26 Diagrama de conexiones para el ensayo de vacío del transformador.

Para llevar a cabo esta prueba se conecta un voltmetro V_1 , el cual mide la tensión aplicada al primario; el voltmetro V_2 , mide la f.e.m E_2 inducida en el secundario; el ampermetro indica la corriente de vacío o de excitación I_0 y un wattmetro mide la potencia de pérdidas en el núcleo (P_n).

Observando la siguiente figura puede verse que, toda la corriente que se consume debe circular por la rama de magnetización del transformador. Los elementos R_1 y X_{d1} son tan pequeños comparados con R_{Fe} y X_m que

producen caídas de voltaje despreciables, así que prácticamente todo el voltaje de alimentación queda aplicado sobre la rama de magnetización.

Cabe recordar que la corriente de vacío (I_e) tiene un valor que oscila entre 1% y 5% de la corriente nominal o de placa (I).

La lectura del wattmetro nos indica:

$$P_n = V_1 I_e \cos \varphi = V_1 I_{Fe} \quad (2.64)$$

Como conocemos P_n y V_1 , despejando la ecuación conocemos I_{Fe} .

$$I_{Fe} = \frac{P_n}{V_1} \quad (2.65)$$

De nuestro circuito equivalente aproximado podemos establecer la siguiente relación:

$$V_1 = I_{Fe} R_{Fe} \quad (2.66)$$

Podemos despejar R_{Fe} quedando:

$$R_{Fe} = \frac{V_1}{I_{Fe}} \quad (2.67)$$

De la expresión:

$$I_e = \sqrt{I_{Fe}^2 + I_m^2} \quad (2.68)$$

Podemos despejar I_m , quedando:

$$I_m = \sqrt{I_e^2 - I_{Fe}^2} \quad (2.69)$$

Del mismo circuito equivalente se puede establecer otra relación:

$$V_1 = I_m X_m \quad (2.70)$$

Y despejando X_m , tenemos:

$$X_m = \frac{V_1}{I_m} \quad (2.71)$$

Las relaciones anteriores (2.64-2.71) nos dan los valores de los parámetros del núcleo del transformador.

Si representamos el triángulo de potencias correspondiente a nuestro circuito reducido es fácil deducir que:

$$\theta_n = \cos^{-1} \frac{P_n}{S_n} \quad (2.72)$$

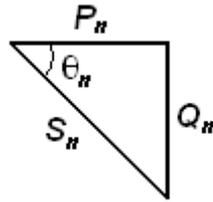


Figura 2.27 Triangulo de potencias para las pérdidas en el núcleo.

Prueba ò ensayo de corto-circuito.

Se trata de establecer las corrientes nominales en los embobinados del transformador, para conocer la pérdida de potencia por efecto joule en los mismos.

Se podrá conectar una carga nominal para cumplir con la condición anterior, pero tendríamos tres inconvenientes:

- a) Podríamos tomar demasiado tiempo en intentar encontrar la carga justa que hiciera circular la corriente nominal.
- b) Se desperdiciaría energía en la carga seleccionada, mientras dura la prueba.
- c) En el caso de un transformador de distribución, que son los utilizados en la industria, nos representaría mucha dificultad suministrar el voltaje de placa en el primario (A.T) en pruebas de laboratorio.

Entonces, en lugar de usar una carga, se usa un artificio:

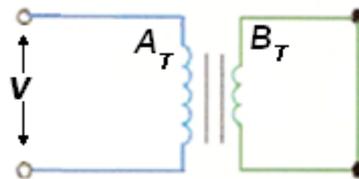


Figura 2.28 Transformador monofásico con el lado de baja tensión en corto circuito

Si $V=0$, no habrá corriente.

Si $V=$ Valor nominal, las corrientes son tan altas que queman el embobinado; se necesita un voltaje de tal valor que circulen las corriente nominales. Empíricamente se ha visto que el valor mencionado fluctúa entre el 3 y 7% del voltaje nominal y la aplicamos con una fuente que nos permita variar el voltaje.

Si en la prueba de circuito abierto, con un voltaje V_1 nominal, la I_0 tenía de 1 a 5% del valor de la corriente nominal, ahora con un 3 a 7% de voltaje aplicado, su valor será completamente despreciable respecto a la corriente nominal. Por ello se elimina del circuito equivalente la rama que representa al núcleo.

Entonces el circuito será:

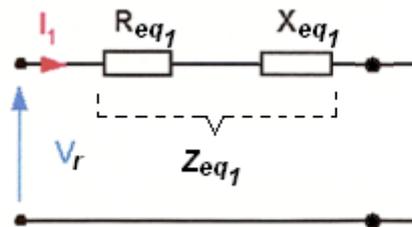


Figura 2.29 Circuito equivalente para el ensayo de corto circuito.

Según la ley de Kirchhoff para voltajes:

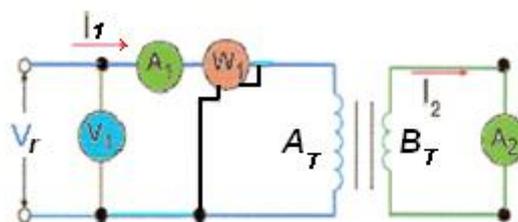
$$V_r = I_1 R_{eq1} + jI_1 X_{eq1} \quad (2.73)$$

V_r = voltaje reducido = caída de voltaje en los bobinados del transformador.

La única potencia que se tiene será la consumida por pérdidas eléctricas en los devanados.

Las pérdidas en el hierro se pueden despreciar, ya que al someter el transformador a una tensión muy baja (la tensión de corto circuito aplicada es del orden del 5% de la nominal primaria), el flujo con el que trabaja el transformador es también muy reducido por lo que dichas pérdidas son insignificantes con respecto a las del cobre.

Para llevar a cabo este ensayo se cortocircuita el secundario y se realiza la siguiente conexión:



Una vez conectados los elementos, se comienza el ensayo aplicando cero volts en el primario, se va subiendo gradualmente la tensión hasta conseguir que el amperímetro A_1 indique un valor de corriente igual a la intensidad nominal primaria correspondiente al transformador a ensayar.

Cuando el ampermetro A_1 indique la intensidad nominal primaria IN_1 , el ampermetro A_2 indicará la intensidad nominal secundaria IN_2 .

Al circular la corriente por el primario y por el secundario, se producirán pérdidas de potencia en la resistencia del primario y del secundario, que se transforman en calor y que para la intensidad nominal serán:

$$P_{CU} = R_1 I_{21N} + R_2 I_{22N} \quad (2.64)$$

Los instrumentos se conectan en alta tensión en virtud que los aparatos quedan protegidos al circular corriente nominal pequeña en ese lado, además de usar voltaje de poca magnitud por ser reducido.

La lectura del wattmetro nos indica:

$$P_{cu} = I_1^2 R_{eq1} \quad (2.65)$$

Por lo tanto:

$$R_{eq1} = \frac{P_{cu}}{I_1^2} \quad (2.66)$$

También:

$$V_r = Z_{eq1} I_1 \quad (2.67)$$

$$Z_{eq1} = \frac{V_r}{I_1} \quad (2.68)$$

$$X_{eq1} = \sqrt{Z_{eq1}^2 - R_{eq1}^2} \quad (2.69)$$

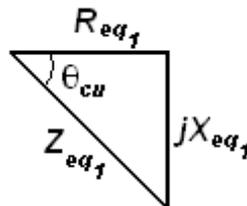


Figura 2.29 Impedancia equivalente en el primario.

De aquí:

$$\cos \theta_{cu} = \frac{R_{eq1}}{Z_{eq1}} \quad (2.70)$$

$$\theta_{cu} = \cos^{-1} \left(\frac{R_{eq1}}{Z_{eq1}} \right) \quad (2.70)$$

Sabemos que $R_{eq1} = R_1 + r^2 R_2$, y como $R_1 = r^2 R_2$:

$$R_{eq1} = R_1 + R_1 = 2R_1 \quad (2.71)$$

Por lo tanto:

$$R_1 = \frac{R_{eq1}}{2} \quad (2.72)$$

Similarmente:

$$R_{eq1} = r^2 R_2 + r^2 R_2 = 2r^2 R_2 \quad (2.73)$$

$$R_2 = \frac{R_{eq1}}{2r^2} \quad (2.74)$$

De igual forma se encuentra:

$$X_{d1} = \frac{X_{eq1}}{2} \quad (2.75)$$

$$X_{d2} = \frac{X_{eq1}}{2r^2} \quad (2.76)$$

Nota: al realizar las pruebas anteriores, es necesario anotar la temperatura ambiente del local en donde se encuentra el transformador, para los cálculos de extrapolación que indican las normas eléctricas.

En síntesis podemos definir estas pruebas o ensayos de la siguiente manera:

Para la prueba o ensayo de vacío.

- 1) La prueba se hace en el lado de baja tensión.
- 2) Se realiza a voltaje nominal.
- 3) Se conecta sin ninguna carga en el secundario.
- 4) Se utilizan aparatos convencionales.
- 5) Los parámetros a obtener son: Corriente de excitación (ampermetro), pérdidas por histéresis y corrientes parásitas (wattmetro), voltaje nominal, así como las variables R_{fe} , X_m , I_m , I_{fe} .

Para la prueba o ensayo de corto circuito.

- 1) Se hace en el lado de alta tensión.
- 2) Se cortocircuita el lado secundario.
- 3) Se utiliza un voltaje reducido.

- 4) Se hace circular la corriente nominal en ambos devanados.
- 5) El ampermetro mide la corriente nominal, el wattmetro mide las pérdidas por efecto Joule en ambos devanados, el voltmetro mide el voltaje reducido.
- 6) Las variables a obtener son: R_1 , X_1 , R_2 , X_2 , X_{eq} , R_{eq} , Z_{eq} .

2.12 Porcentaje de impedancia

En la prueba de pérdidas eléctricas se tiene un voltaje de prueba V_r que podemos relacionarlo con respecto al voltaje nominal:

$$\% \text{ de caída de voltaje} = \frac{V_r}{V_{nominal}} * 100 \quad (2.77)$$

A esta expresión se le denomina “porcentaje de impedancia” debido a que la impedancia de transformación es la constante de la caída de voltaje

$$\% Z = \frac{V_r}{V_{nominal}} * 100 \quad (2.77)$$

Este dato es muy importante cuando se diseñan líneas de alimentación eléctrica o cuando se conectan transformadores en paralelo. En este último caso, si se tienen diferentes $\%Z$ contaremos con distintos voltajes de salida, y por consiguiente circularán corrientes eléctricas no previstas en el diseño original, con los efectos consecuentes.

2.13 Eficiencia.

Es la relación entre la potencia suministrada a la carga por el secundario (P_2) y la potencia absorbida por la red por el primario (P_1), expresada en porcentaje, de esta forma, la eficiencia se expresa como:

Por definición, eficiencia = $\eta = \frac{\text{Potencia de salida}}{\text{Potencia de entrada}} * 100 \quad (2.78)$

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} * 100 \quad (2.79)$$

Cómo ya sabemos, siempre habrá pérdidas.

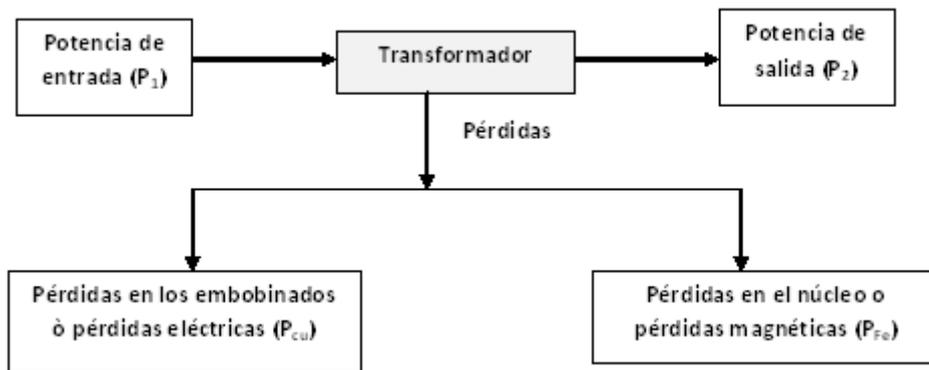


Figura 2.30 Representación esquemática de las pérdidas en un transformador.

$$\eta = \frac{\text{Potencia de entrada} - \text{Pérdidas}}{\text{Potencia de entrada}} * 100 \quad (2.80)$$

La potencia que el transformador toma de la red de entrada, es la suma de la potencia proporcionada a la carga más las pérdidas que se producen en los circuitos magnéticos (núcleo) y los devanados de cobre:

$$P_1 = P_2 + P_{Fe} + P_{cu} \quad (2.81)$$

Por lo tanto:

$$\eta = \frac{P_2}{P_2 + P_{Fe} + P_{cu}} * 100 \quad (2.82)$$

En donde:

η = eficiencia

P_2 = Potencia cedida a la carga

P_{Fe} = Pérdidas en el hierro

P_{cu} = Pérdidas en el cobre.

2.14 Regulación de voltaje.

Decimos que tenemos plena carga en un transformador, cuando la carga conectada al secundario, hace circular, a voltaje nominal, la corriente nominal en el secundario con un factor de potencia igual al de la carga.

Si súbitamente desconectamos la carga, el voltaje de salida V_2 variará incrementándose. La diferencia de voltaje en el secundario cuando tenemos plena carga y cuando está sin carga (vacío), se define como regulación de voltaje.

El voltaje en vacío debe ser mayor para que al conectar la carga y circular corriente, la caída de voltaje en el transformador nos reduzca el voltaje de vacío al voltaje nominal o voltaje de placa.

$$\% \text{ de regulación de voltaje} \triangleq \frac{V_{2\text{vacío}} - V_{2\text{placa}}}{V_{2\text{placa}}} * 100 \quad (2.83)$$

O si se prefiere:

$$\% \text{ de regulación de voltaje} \triangleq \frac{V_1 \left(\frac{1}{r} \right) - V_{2\text{placa}}}{V_{2\text{placa}}} * 100 \quad (2.83)$$

Este es un dato importante, ya que si existe algún defecto en el transformador y al conectar la carga, el voltaje de salida V_2 es menor que el indicado en la placa se causarán trastornos en equipo electromecánico como motores y relevadores, así como en los sistemas de iluminación.

Veamos el circuito equivalente aproximado de un transformador referido al secundario, en donde despreciamos la corriente de excitación.

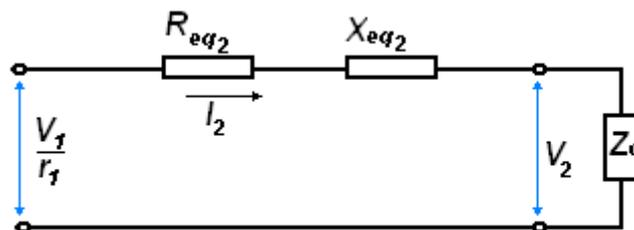


Figura 2.31 Circuito equivalente aproximado de un transformador referido al secundario.

Por ley de kirchhoff:

$$\frac{V_1}{r} = V_2 + I_2(R_{eq2} + jX_{eq2}) \quad (2.84)$$

La representación fasorial respectiva será:

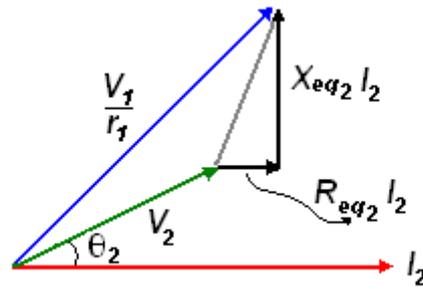


Figura 2.32 Diagrama fasorial del circuito equivalente aproximado de un transformador referido al secundario.

Si proyectamos el fasor V_2 :

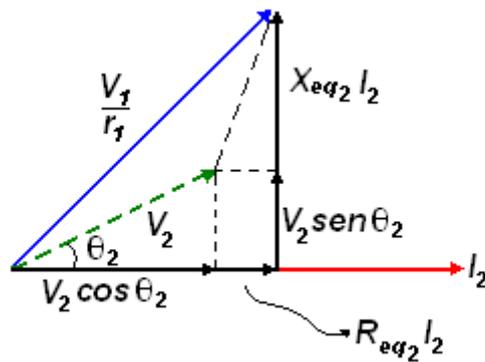


Figura 2.32 Diagrama fasorial del circuito equivalente aproximado de un transformador referido al secundario en función del factor de potencia de la carga.

Aplicando el teorema de Pitágoras, $\frac{V_1}{r_1}$ se obtiene por:

$$\frac{V_1}{r_1} = \sqrt{(V_2 \cos \theta_2 + R_{Eq2} I_2)^2 + (V_2 \sin \theta_2 + X_{Eq2} I_2)^2} \quad (2.85)$$

De esta manera $\frac{V_1}{r_1}$ queda en función del factor de potencia de la carga.

2.15 Transformadores trifásicos

Se puede decir, que un transformador trifásico está constituido por tres transformadores monofásicos montados en un núcleo magnético común. La constitución más común es de tres columnas, con los arrollamientos primarios y secundarios alternados o concéntricos.

El estudio del transformador trifásico se puede reducir al monofásico a condición de trabajar con los valores por fase. En este sentido, la fórmula de potencia a aplicar, en vacío, en carga o en cortocircuito, será trifásica y no monofásica.



Figura 2.33 Transformador trifásico.

2.16 Normalización de terminales

Para simplificar la conexión de los transformadores y evitar la necesidad de pruebas de polaridad, rotación de fase, etc., el IEEE creó su norma C57.12.70-2000 "*IEEE Standard Terminal Marking and Connections for Distribution and Power Transformers*", en donde se menciona la forma en que deben ser marcadas las terminales y los tipos de conexiones en transformadores trifásicos y monofásicos; de distribución, potencia y de regulación. Esta norma cubre lo relacionado con la secuencia de designación; designación de terminales externas, designación de terminales de neutro y tierra, etc. También menciona los conceptos de polaridad aditiva y sustractiva, así como lo relacionado con el paralelismo de transformadores. Finalmente describen las conexiones monofásicas estandarizadas, y menciona el desplazamiento angular en arreglos de bancos trifásicos. Esta norma agrupa toda la información necesaria acerca de las conexiones de transformadores.

La norma especifica que las terminales de Alta tensión en un transformador monofásico o trifásico deben ser marcadas con la letra H, mientras que las de baja tensión con la letra X; los subíndices de estas literales deben corresponder a la polaridad instantánea de los devanados, es decir, que H_1 tiene la misma polaridad instantánea que X_1 .

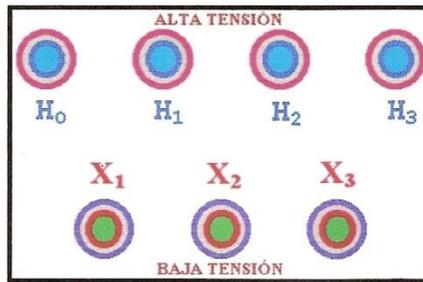


Figura 2.34 Nomenclatura de terminales (ANSI).

2.17 Conexión de transformadores en paralelo

La conexión de transformadores en paralelo se hace necesaria debido a los incrementos de la demanda que superan la capacidad existente o cuando los requerimientos de confiabilidad y continuidad de operación lo exigen, si un transformador falla, el otro continuará alimentando la carga sin interrupción. Cuando la demanda de energía se reduce temporalmente, resulta más económico operar un transformador pequeño cerca de su límite de capacidad a plena carga que un transformador mayor a capacidad reducida. Por lo que, cuando la demanda energética es muy fluctuante resulta más provechoso la instalación de dos o más transformadores en paralelo que utilizar un transformador de gran capacidad. En estas condiciones el sistema es más flexible porque tiene la posibilidad de agregar una parte de los transformadores en paralelo cuando sea necesario.

Los transformadores marcados según la norma C5712.70-2000 pueden operar en paralelo por la simple conexión de terminales numeradas igualmente; es decir, si tienen características similares como relación de vueltas, impedancia, capacidad nominal, frecuencia, deben tener el mismo arreglo en los devanados, estar conectados con la misma polaridad, la misma rotación de fase y el mismo desplazamiento angular.

La división de la corriente de carga, en proporción a las capacidades de KVA de los transformadores en paralelo está determinada por la igualdad de sus voltajes nominales, relación de vueltas en los devanados, porcentaje de impedancias y relaciones de su reactancia a su resistencia. Si estas condiciones no se cumplen, las corrientes de carga no se pueden dividir proporcionalmente en las capacidades nominales de KVA de los transformadores, y puede surgir una diferencia de fase entre las corrientes. Sin embargo, a pesar de la gran ayuda que ofrece la norma, siempre es bueno saber cómo verificar la polaridad, secuencia de fase y desplazamiento angular en el transformador.

Cuando los voltajes inducidos están en la misma dirección se dice que se tiene polaridad substractiva como se observa en la siguiente figura. Las

terminales H_1 y X_1 estarán del lado izquierdo viendo el transformador del lado de bajo voltaje hacia el lado de alto voltaje y cuando los voltajes inducidos en los devanados de alta y baja tensión del transformador se encuentran en oposición, se tiene polaridad "aditiva". La terminal X_1 se encontrará del lado derecho.

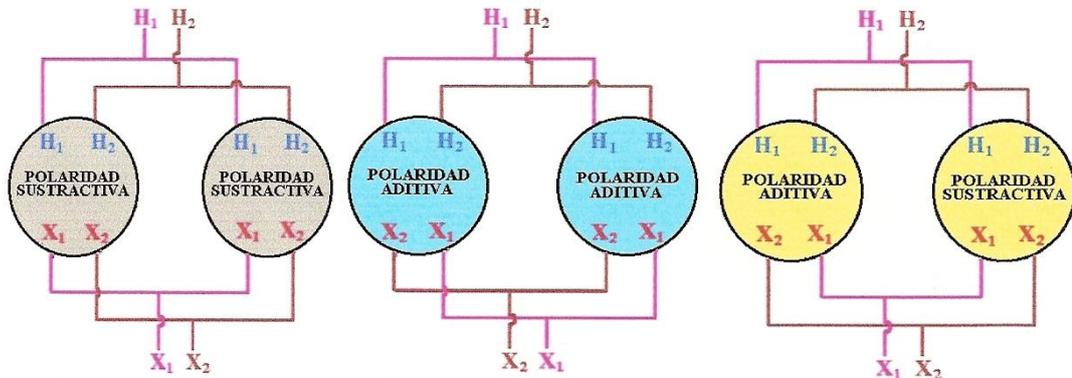


Figura 2.35 Conexiones de transformadores monofásicos en paralelo.

2.18 Conexiones de transformadores trifásicos.

La transformación trifásica se puede realizar por medio de tres transformadores monofásicos en conexión trifásica o por medio de transformadores trifásicos. Los métodos de conexión de los devanados para la conexión trifásica son los mismos, ya sea que se usen tres devanados en un transformador trifásico o bien tres transformadores monofásicos por separado, en conexión trifásica. Las conexiones trifásicas más comunes son:

- 1.- *Conexión estrella - estrella (Y-Y).*
- 2.- *Conexión estrella - delta. (Y- Δ)*
- 3.- *Conexión delta - estrella. (Δ -Y)*
- 4.- *Conexión delta - delta (Δ - Δ)*

1) **Conexión estrella - estrella (Y- Y).**

La conexión estrella-estrella da un servicio satisfactorio en las cargas trifásica balanceadas; cuando la carga se desbalancea, el neutro eléctrico estará en el centro exacto de un punto que hará desigual los tres voltajes de línea a neutro.

Esta conexión se emplea en sistemas que operan con tensiones relativamente elevadas y en instalaciones de potencia de 4 hilos; sin embargo, tiene los siguientes inconvenientes:

- a) Si la carga del transformador es desbalanceada, produce fuertes desbalances en los voltajes de fase del transformador.
- b) No presenta oposición a los armónicos impares (especialmente el tercero). Debido a esto la tensión del tercer armónico puede ser mayor que el mismo voltaje fundamental.

- c) En caso de fallar por alguna razón uno de los transformadores no es posible alimentar carga trifásica.
- d) En una conexión Y-Y, el voltaje primario de cada fase se expresa por:

$$V_{FP} = V_{LP} / \sqrt{3} \quad (2.86)$$

y está relacionada con el voltaje secundario de fase mediante la relación de espiras del transformador. El voltaje secundario de fase y el voltaje secundario de línea se relacionan por:

$$V_{LS} = \sqrt{3} V_{FS} \quad (2.87)$$

En consecuencia, la relación de voltajes del transformador es:

$$V_{LP} / V_{LS} = (\sqrt{3} V_{FP}) / (\sqrt{3} V_{FS}) = r \quad (2.88)$$

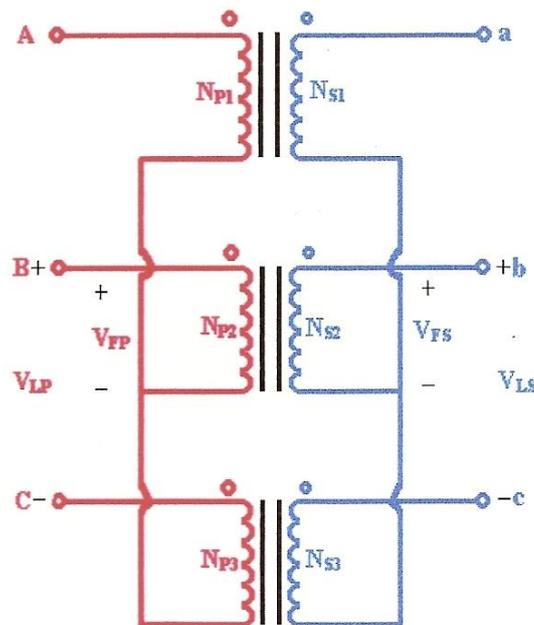


Figura 2.36 Conexión estrella-estrella.

Los problemas de desequilibrio de voltajes y del tercer armónico, pueden solucionarse juntos usando alguna de las dos técnicas que se mencionan a continuación:

- a) Conectar sólidamente a tierra los neutros de los transformadores (especialmente el del primario). Esto permite que los componentes adicionales del tercer armónico originen un flujo de corriente en el

neutro, en lugar de causar sobrevoltajes. El neutro también proporciona un recorrido de retorno a cualquier desequilibrio de corriente de la carga.

- b) Agregar un tercer devanado (terciario) conectado en delta al grupo de transformadores. Esto permite que se origine un flujo de corriente circulatoria dentro del devanado, permitiendo que se eliminen los componentes del tercer armónico del voltaje, en la misma forma que lo hace la conexión a tierra de los neutros.

En la práctica muy pocos transformadores con esta configuración son usados. A pesar de no ser necesario, los arrollamientos terciarios tienen terminales hacia el exterior del transformador puesto que frecuentemente son utilizados para servicios auxiliares de la subestación donde está ubicado el transformador. Como el terciario debe ser capaz de soportar las corrientes circulantes, normalmente la capacidad del terciario es igual a 1/3 de la potencia nominal de los otros dos devanados.

2) Conexión estrella — delta (Y-Δ).

En esta conexión el voltaje primario de línea se relaciona con el voltaje primario de fase mediante la siguiente relación:

$$V_{LP} = \sqrt{3} V_{FP} \quad (2.89)$$

Mientras que las tensiones secundarias de línea y de fase son iguales:

$$V_{LS} = V_{FS} \quad (2.90)$$

La relación de tensiones de fase es:

$$V_{FP}/V_{FS} = r \quad (2.91)$$

De tal manera que la relación total entre el voltaje de línea en el lado primario del grupo y el voltaje de línea en el lado secundario del grupo es:

$$V_{LP}/V_{LS} = \sqrt{3}V_{FP}/V_{FS} \quad (2.92)$$

$$V_{LP}/V_{LS} = \sqrt{3} r \quad (2.93)$$

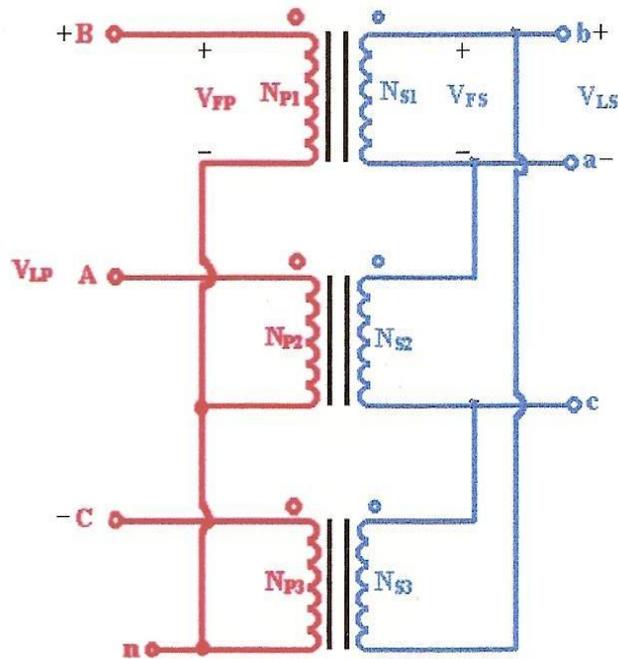


Figura 2.37 Conexión estrella-delta.

La conexión Y- Δ no tiene problema con los componentes de tercer armónico de voltaje, ya que estos se consumen en corriente circulante en el lado conectado en delta. Esta conexión es más estable bajo carga des-balanceada, ya que la delta redistribuye parcialmente cualquier des-balance que se presente.

Esta disposición tiene un problema. Debido a la conexión delta, las tensiones secundarias se desplazan 30° con respecto a los voltajes del primario, lo cual puede causar inconvenientes al conectar en paralelo los secundarios de dos grupos de transformadores. Los ángulos de fase de las tensiones secundarias deben ser iguales si los transformadores van a conectar en paralelo. Esto significa que debe ponerse atención a la dirección de los 30° de desplazamiento de cada banco de transformadores cuando van a conectarse en paralelo.

La conexión Y- Δ hará que el voltaje secundario se atrase, si la secuencia es abc. Si la secuencia del sistema fase es acb, entonces la conexión hará que el voltaje secundario se adelante al voltaje primario en 30° .

Su aplicación es en los sistemas de transmisión de las subestaciones receptoras cuya función es reducir el voltaje. En sistemas de distribución es poco usual (no tiene neutro) y solo se emplea en algunas ocasiones para distribución rural a 20 KV.

3) Conexión delta-estrella (Δ -Y)

En esta conexión el voltaje de línea primario es igual al voltaje de fase primario,

$$V_{LP} = V_{FP} \quad (2.94)$$

Mientras que los voltajes secundarios se relacionan por:

$$V_{LS} = \sqrt{3}V_{FS} \quad (2.95)$$

Por tanto, la relación entre los voltajes de línea a línea de esta conexión es:

$$V_{LP}/V_{LS} = V_{FP}/(\sqrt{3}V_{FS}) \quad (2.96)$$

$$V_{LP}/V_{LS} = r/\sqrt{3} \quad (2.97)$$

Esta conexión tiene las mismas ventajas y el mismo desplazamiento de fase que el transformador Y-Δ. La conexión que se ilustra, hace que el voltaje secundario atrase el primario en 30°, tal como sucedió anteriormente.

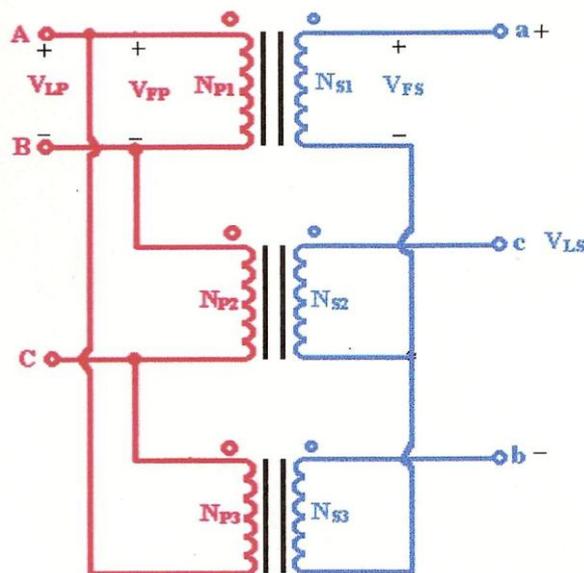


Figura 2.38 Conexión delta-estrella.

Se usa en los sistemas de potencia para elevar voltajes de generación o de transmisión, en los sistemas de distribución industrial (a 4 hilos) para alimentación de fuerza y alumbrado debido a que se tiene acceso a dos tensiones distintas, de fase y línea.

4) Conexión delta—delta (Δ-Δ).

Esta conexión se emplea tanto para elevar la tensión como para reducirla.

En caso de falla o reparación este tipo de conexión, se puede convertir en una conexión delta abierta-delta abierta.

En este tipo de conexión los voltajes de línea y de fase en el primario y en el secundario son iguales:

$$V_{LP} = V_{FP} \quad (2.98)$$

$$V_{LS} = V_{FS} \quad (2.99)$$

Así que la relación entre los voltajes de línea primario y secundario es:

$$V_{LP}/V_{LS} = V_{FP}/V_{FS} = r \quad (2.100)$$

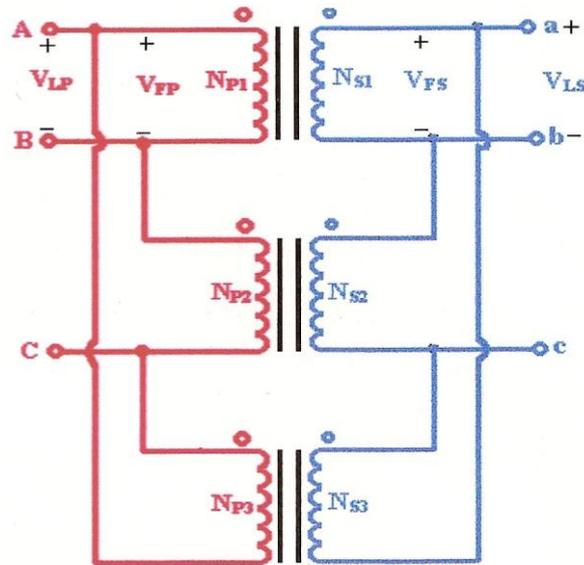


Figura 2.39 Conexión delta-delta.

Esta conexión se utiliza frecuentemente para alimentar sistemas de alumbrado monofásicos y carga de potencia trifásica simultáneamente, presenta la ventaja de poder conectar los devanados primario y secundario sin desfaseamiento y no tiene problemas de cargas des-balanceadas o armónicas. Sin embargo, circulan altas corrientes a menos que todos los transformadores sean conectados con el mismo tap de regulación y tengan la misma tensión. Es ampliamente utilizada en los transformadores de tipo horno, en las industrias de fundición. Su desventaja en altas tensiones es que se requiere aislar cada terminal del transformador al nivel de línea, lo cual se traduce en un costo mayor.

Transformación trifásica mediante dos transformadores monofásicos.

Además de las conexiones trifásicas normales, existen otras formas de lograr transformación trifásica con solo dos transformadores. Las técnicas usadas se basan en la reducción de la capacidad de carga de los transformadores, que algunas veces puede justificarse por ciertos factores económicos. Algunas de las principales conexiones de este tipo son:

a) Conexión delta-abierta (V-V).

En ciertos casos un grupo completo de transformadores puede no utilizarse para lograr transformación trifásica. Suponiendo que un grupo de tres transformadores monofásicos conectados en Δ - Δ , tiene una fase averiada que se debe retirar para repararla. Si los voltajes secundarios restantes son $V_A = V_L \angle 0^\circ$ y $V_B = V_L \angle -120^\circ$ V, entonces el voltaje resultante en el espacio que ocupaba el tercer transformador se expresa por:

$$V_C = -V_A - V_B = -V_L \angle 0^\circ - V_L \angle -120^\circ \quad (2.101)$$

$$V_C = -V - (-0.5V - j0.866V) \quad (2.102)$$

$$V_C = -0.5V + j0.866V \quad (2.103)$$

$$V_C = V_L \angle 120^\circ \quad (2.104)$$

Este sería el voltaje que aparecería entre los mismos puntos si el tercer transformador aún estuviera allí. A la fase C se le llama fase fantasma, en algunas ocasiones. Por tanto, la conexión delta-abierta permite que un grupo con sólo dos transformadores continúe entregando potencia trifásica, aún habiéndosele removido una fase dañada.

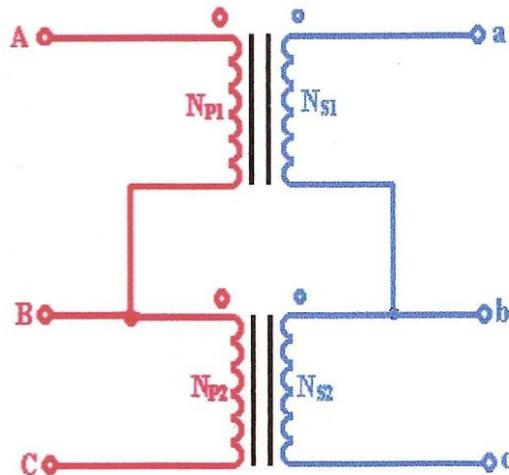


Figura 2.40 Conexión delta abierta-delta abierta.

b) Conexión Y abierta - Δ abierta

Este tipo de conexión es similar a la conexión delta-abierta, con la diferencia de que los voltajes primarios se obtienen a partir de dos fases y el neutro.

Se utiliza para alimentación pequeños consumidores comerciales que necesitan servicio trifásico en zonas rurales donde no se dispone de las tres fases. Con esta conexión un consumidor puede obtener servicio trifásico de

manera provisional, hasta que el aumento de la demanda requiera la instalación de la tercera fase.

La mayor desventaja de la conexión la constituye la gran corriente de retorno que debe fluir por el neutro del circuito primario.

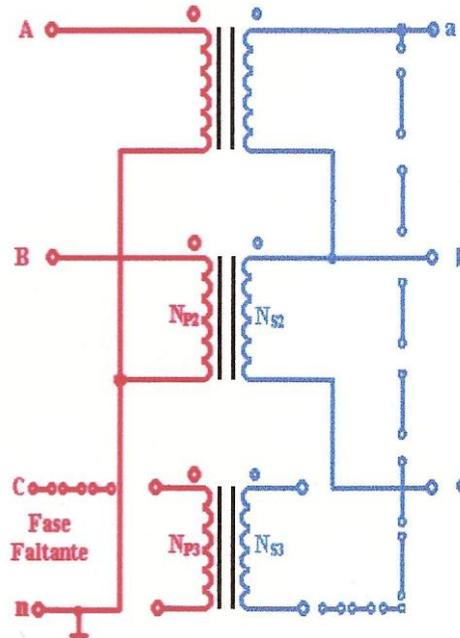


Figura 2.41 Conexión estrella abierta-delta abierta.

c) Conexión Scott-T

La conexión Scott-T es la manera de obtener dos fases, separadas 90° de una fuente de alimentación trifásica. En los comienzos de la transformación de C.A. los sistemas de potencia bifásicos y trifásicos eran comunes y se requería la interconexión entre dichos sistemas. La conexión Scott-T de transformadores se desarrolló para lograr dicho propósito.

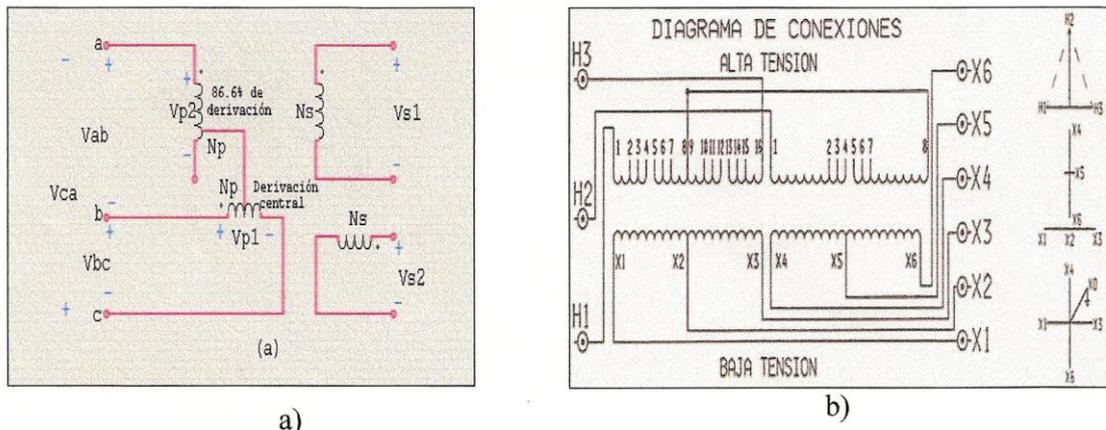


Figura 2.42 a) Diagrama esquemático de la conexión Scott-T. b) Diagrama de un transformador Scott-T práctico.

Esta conexión consiste de dos transformadores monofásicos con idéntica potencia nominal. Uno tiene derivación en su bobinado primario al 86.6% de voltaje a plena carga. Están conectados tal como se ilustra en la figura (a). La derivación del 86.6% del transformador T_2 debe conectarse al punto medio del transformador T_1 (derivación central). Los voltajes aplicados a los devanados primarios son voltajes trifásicos balanceados ($V_{ab} = V_L \angle 120^\circ$, $V_{bc} = V_L \angle 0^\circ$ y $V_{ca} = V_L \angle -120^\circ$) y los voltajes resultantes, producirán una salida bifásica. Un diagrama vectorial de los posibles voltajes de salida en estos tipos de transformadores se muestra en la figura (b).

También es posible convertir potencia bifásica en potencia trifásica por medio de esta conexión, pero como existen muy pocos generadores bifásicos en uso, esto casi nunca se hace.

d) Conexión trifásica en T

La conexión Scott T usa dos transformadores para convertir potencia trifásica en potencia bifásica a diferente nivel de voltaje. Por medio de una sencilla modificación en dicha conexión, los mismos dos transformadores pueden convertir potencia trifásica en potencia trifásica de diferente nivel de voltaje. Esta conexión se ilustra en la figura siguiente (e). Aquí, tanto el primario como el secundario del transformador T_2 tienen derivaciones a nivel del 86.6%, estas derivaciones están conectadas a las derivaciones centrales de los correspondientes bobinados del transformador T_1 . En esta conexión a T_1 se le llama transformador principal y a T_2 transformador excitador.

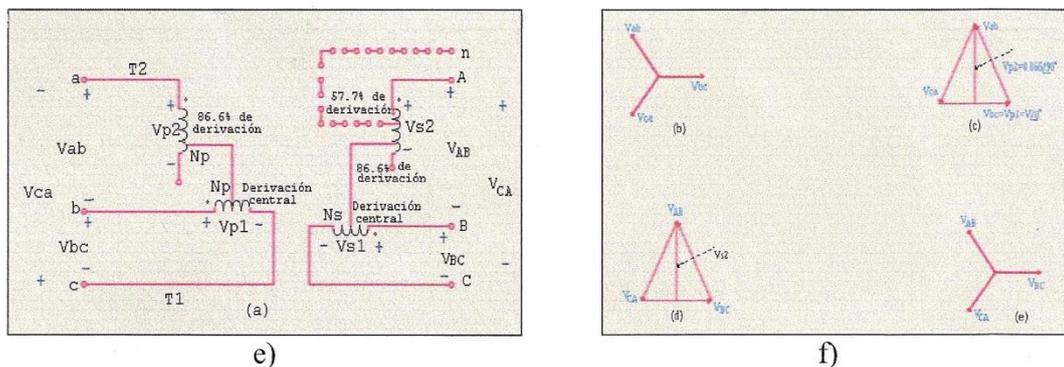


Figura 2.43 e) Diagrama esquemático de la conexión trifásica en T. f) Voltajes de entrada y salida.

Como en la conexión Scott T, las tensiones de alimentación trifásicas producen dos voltajes desfasados 90° en los devanados primarios de los transformadores. Estos voltajes primarios a su vez producen tensiones secundarias también desfasadas 90° . Sin embargo, a diferencia de la conexión Scott T, las tensiones secundarias se recombinan para producir salida trifásica.

$$V_{ab} = VL120^{\circ} \quad V_{bc} = VL0^{\circ} \quad V_{ca} = VL-120^{\circ} \quad (2.105)$$

Una ventaja principal de la conexión T trifásica sobre las otras conexiones trifásicas con dos transformadores es que se puede conectar un neutro, tanto en el primario como en el secundario del grupo de transformadores. Esta conexión se usa algunas veces en transformadores trifásicos de distribución, debido a que sus costos de fabricación son más bajos que los de un grupo completo de transformadores trifásicos.

CAPÍTULO III PRUEBAS CON BAJA Y ALTA TENSION.

PRUEBAS CON BAJA TENSION

En esta parte desarrollaremos pruebas en las que se requieren bajas tensiones, comprendidas desde los voltajes de pilas secas con las que se excitan algunos instrumentos de medición, hasta las tensiones nominales de los transformadores en prueba como máximo. Tales pruebas son las siguientes:

- Medición de la resistencia óhmica
- Medición de la resistencia de aislamiento
- Relación de transformación
- Polaridad o secuencia de fases
- Desplazamiento angular y verificación del diagrama fasorial
- Pérdidas magnéticas y corriente de excitación.
- Pérdidas eléctricas y porcentaje de impedancia
- Elevación de temperatura

3.1. Medición de la resistencia óhmica.

Objetivo:

La medición de la resistencia óhmica de los devanados tiene fundamental importancia para tres propósitos:

- a) Para el cálculo de las pérdidas por efecto joule ($R I^2$) de los devanados.
- b) Para el cálculo de la temperatura promedio de los devanados al final de la prueba de elevación de temperatura.
- c) Como un antecedente para determinar una posible falla.

La medida de la resistencia óhmica juega un doble papel en esta prueba, como ya se mencionó, y es evaluar las pérdidas por efecto joule del conjunto de pérdidas que se determinan, y es estimar la temperatura dentro de los embobinados, ya que no es posible medirla directamente con los instrumentos sensores de temperatura. Para este último cálculo, se vuelve a medir la resistencia óhmica al término de la prueba, y valiéndonos del coeficiente térmico de resistividad, conociendo cuál ha sido la variación en la resistencia podemos determinar la correspondiente variación en la temperatura.

Aunque la prueba de temperatura es de las últimas pruebas que se realizan en los transformadores, es recomendable medir la resistencia óhmica en frío antes que ninguna otra prueba, para garantizar que no ha habido causas de

precalentamiento en los embobinados, y así el valor medido corresponderá a la temperatura ambiente.

Generalidades

Debe determinarse con la mayor precisión posible la temperatura de los devanados al hacer la medición de la resistencia en frío. Con tal objeto deben tomarse las precauciones siguientes:

- a) La medición de la resistencia en frío no debe hacerse cuando el transformador esté localizado en un lugar donde existan corrientes de aire o en un local donde la temperatura ambiente cambie rápidamente.
- b) Para transformadores no inmersos en líquido aislante, la temperatura de los devanados debe registrarse como el valor promedio de las lecturas de dos o más termómetros, teniendo cuidado de que el elemento sensible de los termómetros este tan cerca como sea posible al conductor de los devanados. No debe considerarse que los devanados estén a la misma temperatura que tiene el aire que está alrededor de ellos.
- c) La temperatura de los devanados debe considerarse igual que la temperatura promedio del líquido aislante, siempre y cuando el transformador haya estado sin energizar sus devanados de 3 h a 8 h, dependiendo de su tamaño, y antes de hacer la medición de la resistencia en frío y la diferencia de temperaturas en el aceite entre la parte superior e inferior del tanque no exceda en 5 °C.
- d) Cuando se mida la resistencia en frío previo a la prueba de elevación de temperatura, debe registrarse el tiempo de estabilización. Este tiempo debe dejarse transcurrir en la prueba de elevación de temperatura, antes de tomar la primera lectura de la resistencia después del corte de energía.
- e) Si el devanado bajo prueba tiene una constante de tiempo apreciable, puede lograrse más rápidamente la estabilización con una tensión inicial mayor que la necesaria, la que posteriormente debe disminuirse conforme la corriente se aproxima a las condiciones de estabilización.

3.1.1 Método de caída de tensión

Este método consiste en hacer circular por el devanado una corriente directa cuyo valor se mide con la mayor precisión, e igualmente se mide la caída de potencial entre los extremos de la bobina, usando las conexiones mostradas en la figura 3.0. La resistencia se calcula con las lecturas obtenidas de acuerdo con la Ley de Ohm.

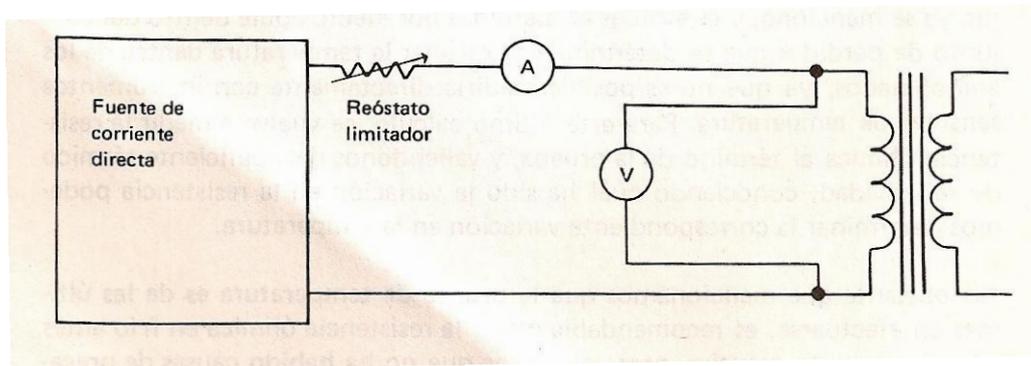


Figura 3.0 Diagrama del circuito para la medición de la resistencia por caída de tensión.

Aplicando la ley de ohm, se determina la resistencia correspondiente.

Es necesario tener en cuenta que bajo condiciones de corriente directa en estado estable no existe la reactancia del devanado; la única limitante al paso de la corriente es la resistencia óhmica cuyo valor es muy pequeño (desde fracciones de ohm hasta unos cuantos ohms, de acuerdo al embobinado), y por lo tanto la tensión aplicada debe ser muy pequeña de modo que la corriente circulante no exceda el 15 % de la nominal, de manera que se evite en lo posible el calentamiento del devanado.

Si la fuente de corriente directa tiene un voltaje elevado, se incluye en el circuito un reóstato limitador.

Por las razones expuestas, el método de caída de tensión, debe emplearse solamente si la corriente nominal del devanado del transformador es de por lo menos un ampere.

Si la corriente continua es suministrada por una máquina de conmutación, la aguja del voltímetro puede oscilar debido a las variaciones de la tensión producidas por el conmutador. En tales casos alguno de los devanados del transformador que no sea el devanado bajo prueba, debe ponerse en corto circuito para amortiguar las variaciones de la tensión.

La corriente en el devanado que está bajo prueba debe ser prácticamente constante antes de poner otro devanado en corto, ya que de otra manera pueden obtenerse valores erróneos de resistencia. Por experiencia se sabe que la estabilidad de una corriente continua se logra más rápidamente bajo condiciones de circuito abierto que bajo condiciones de cortocircuito.

De acuerdo con la figura 3.0 el equipo necesario para esta prueba es:

- Fuente de corriente directa.
- Reóstato limitador de corriente.
- Ampermetro con escala aproximada del 20% de la corriente nominal.

- Voltmetro de pequeña escala o milivoltmetro según el rango de resistencia por medir.

La resistencia se calculará, según el caso por medio de las fórmulas:

$$R = \frac{\text{Volts}}{\text{Amperes}} \quad R = \frac{\text{Milivolts}}{1000 * \text{Amperes}} \quad (3.1)$$

Si el embobinado tiene derivaciones, es necesario medir la resistencia para cada una de ellas.

Para transformadores trifásicos en los cuales los embobinados se encuentran conectados en el interior del tanque, ya sea en circuito delta o estrella, se calcula la resistencia de una fase según el caso, efectuando la medición entre dos terminales del circuito.

Para la medición mostrada en la figura 3.1 llamaremos R^1 al valor de la resistencia calculada de acuerdo a las lecturas y R al valor de la resistencia de una fase.

$$R^1 = \frac{\text{Volts}}{\text{Amperes}} \quad \text{ò} \quad R^1 = \frac{\text{Milivolts}}{1000 * \text{Amperes}} \quad (3.2)$$

$$R = \frac{3}{2} R^1 \quad (3.3)$$

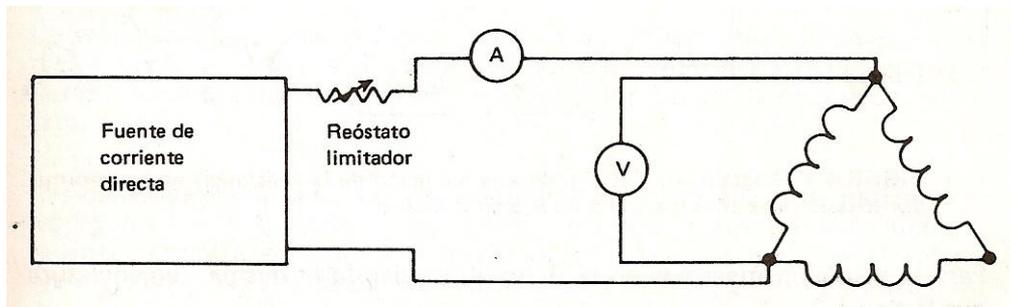


Figura 3.1 Diagrama del circuito para la medición de la resistencia de un transformador trifásico en circuito delta.

Para la medición mostrada en la figura 3.2, el cálculo de acuerdo a las lecturas es el valor de la resistencia en cada fase.

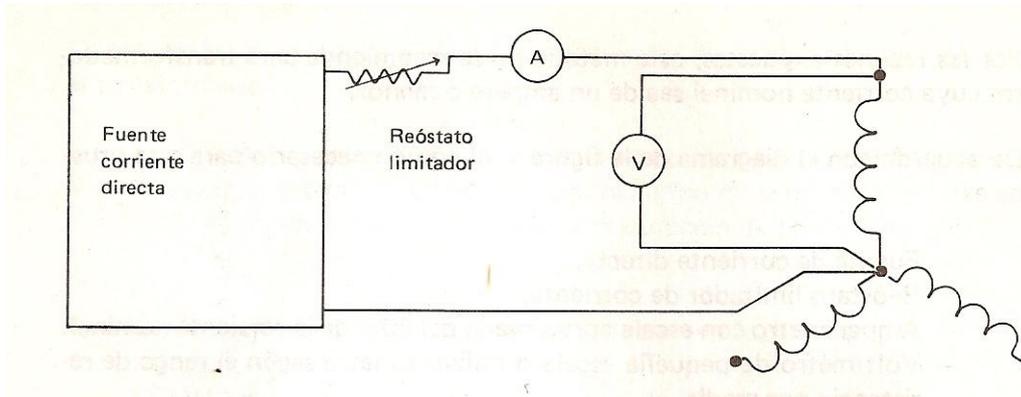


Figura 3.2 Diagrama del circuito para la medición de la resistencia de un transformador trifásico en circuito estrella con acceso al neutro.

Para la medición mostrada en la figura 3.3 siguiendo la misma nomenclatura de la figura 3.1.

$$R = \frac{1}{2} R^1 \quad (3.4)$$

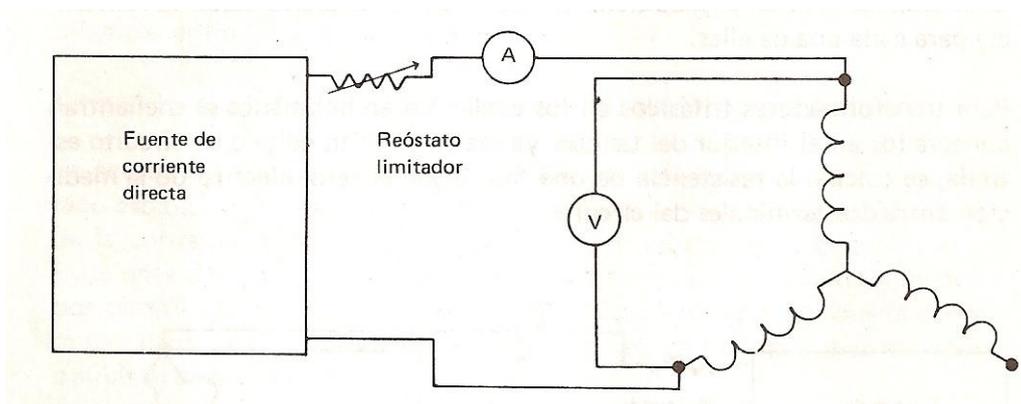


Figura 3.3 Diagrama del circuito para la medición de la resistencia de un transformador trifásico en circuito estrella con sin acceso al neutro.

3.1.2 Método de puente.

El método de puente es aplicable a todos los casos de medición de la resistencia. Se prefiere generalmente debido a su exactitud, ya que las corrientes pequeñas con que trabaja no alteran el valor de la resistencia por cambio de temperatura; este método es obligatorio en los casos en que la corriente nominal del devanado bajo prueba, sea menor que un amper.

El método de puente es recomendable especialmente para todas las mediciones que se usen con el propósito de determinar la elevación de temperatura promedio de los devanados del transformador.

El uso de puentes para la medición de resistencias presenta ventajas notables con respecto al método de caída de potencial y prácticamente ninguna desventaja.

Entre las ventajas sobresalientes podemos mencionar:

- Mayor precisión
- Conexión sencilla
- Circulación de corriente de muy pequeña intensidad
- Mayor rapidez en la prueba.

Existen varios tipos de puentes de los cuales los más usuales son el de Wheatstone y el de Kelvin.

El puente de Wheatstone tiene un rango de medición desde fracciones de Ohm hasta Kiloohms. Podría suponerse que en vista de que mide fracciones de ohms, sería adecuado para la prueba, pero tiene el inconveniente de que la caída de potencial la detecta en la misma línea por la que circula la corriente, de manera que la lectura incluye la resistencia del devanado bajo prueba más la resistencia de los cables de conexión.

El puente Kelvin tiene un rango de medición desde fracciones muy pequeñas de ohm hasta unos cuantos ohms. Tiene la ventaja de tener una línea por la que circula la corriente, y otra línea distinta (en donde se incluye el circuito del galvanómetro) para detectar la caída de potencial. Esta línea se conecta a las terminales del devanado bajo prueba, lo cual hace que la medición no incluya la caída en los cables de conexión.

Esta es la razón por la que se recomienda el puente Kelvin para medición de resistencias pequeñas.

La circulación de corrientes de pequeña intensidad no provoca calentamiento del devanado, por lo que este método se recomienda para todos los casos, incluyendo transformadores cuya corriente nominal sea menor que un ampere.

La sencillez de las conexiones, y por lo tanto la rapidez para obtener una medición hace que este sea el único método recomendable para la medición de la resistencia óhmica en caliente, es decir, al término de la prueba de temperatura.

Las conexiones para medición se realizan en forma similar a las indicadas en las figuras 1 a la 4, sustituyendo la línea del ampermetro por la corriente, y la línea del voltmetro por la línea de potencial. En el caso de transformadores trifásicos, los cálculos para la resistencia de una fase son los mismos.

3.2. Medición de la resistencia de aislamiento.

Los conductores con los cuales se devanan los transformadores deben estar perfectamente aislados para evitar que entren en contacto las espiras, las capas y las bobinas de alta y baja tensión entre sí, así como las bobinas y el núcleo (frecuentemente identificado como tierra).

La calidad y el estado de los aislamientos son aspectos de especial interés en las pruebas de los transformadores, puesto que de ellos depende la vida útil del equipo.

La primera prueba para detectar el estado de los aislamientos es la medición de su resistencia, cuyo valor debe ser del orden de cientos de megohms. Un valor bajo como resultado de la prueba indicaría posible humedad en los aislamientos, y una lectura de cero ohms indicaría un deterioro grande en algún punto del devanado, por donde se produce una fuga de corriente hacia otro elemento.

Los aislamientos se deben medir:

- Entre los devanados de alta y baja tensión.
- Entre el devanado de alta tensión y tierra.
- Entre el devanado de baja tensión y tierra.

Para ello se emplea un tipo de megohmetro comercialmente conocido como Megger. Se trata de instrumentos que generan altas tensiones (usualmente 500 0 2000 volts) y de acuerdo a la intensidad de corrientes de fuga, marcan directamente en su carátula el valor de resistencia de aislamiento.

En vista de que las posibles fluctuaciones en el voltaje generado pueden inducir tensiones en los embobinados del transformador, que involucren algún error en la lectura, se recomienda poner en circuito-corto las terminales de alta tensión entre sí.

3.3 Relación de transformación.

La relación de transformación puede definirse en función de las características de construcción o en función de las variables de operación.

En función de las características de construcción es la razón del número de vueltas del devanado de alta tensión al número de vueltas del devanado de baja tensión.

$$r = \frac{N_H}{N_x} \quad (3.5)$$

Desde el punto de vista de las pruebas de laboratorio, la segunda definición es la que nos interesa. En esta definición incluimos la necesidad de que el

transformador se excite en vacío, es decir, sin carga, puesto que si existieran corrientes en los devanados, las tensiones que mediríamos no serían iguales a las fuerzas electromotrices inducidas, debido a que se producirían caídas de voltaje en las resistencias y reactancias de dispersión.

Para determinar la relación de transformación en laboratorio existen tres métodos:

- a) Método de los dos voltmetros
- b) Método del transformador patrón
- c) Método del potenciómetro de resistencia.

Básicamente, los tres métodos consisten en aplicar a uno de los devanados una tensión alterna, y detectar el valor del voltaje inducido en el otro devanado. Los artificios para llevar a cabo estas operaciones son lo que dan las tres variantes fundamentales.

En todos los casos es importante efectuar las conexiones respetando la polaridad de los devanados.

Cuando se aplica a un devanado una onda senoidal de voltaje, en el otro devanado se induce otra onda proporcional a la aplicada. La onda aplicada y la inducida prácticamente se encuentran en fase, de manera que habrá una terminal de alta tensión y una de baja tensión que en cualquier instante tengan siempre la misma polaridad. Estas terminales se identifican en los diagramas con un punto, y en las terminales del transformador con mismos subíndices (figura 3.4).

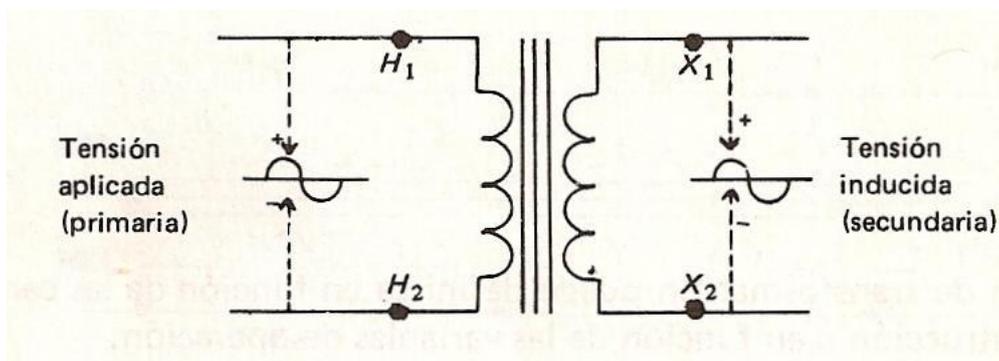


Figura 3.4 identificación de las terminales de misma polaridad.

En la figura 3.4 como ejemplo el instante en que la onda de voltaje primario es positiva; la terminal de voltaje secundario que ese instante sea también positiva corresponde a la misma polaridad.

3.3.1 Método de los dos voltímetros.

Consiste en aplicar a uno de los devanados del transformador una tensión alterna, incluyendo un voltmetro para medir la alta tensión (V_H) y otro para medir la baja tensión (V_x).

La razón de la alta tensión a la baja tensión nos dará la relación de transformación.

$$r = \frac{N_H}{N_x} \quad (3.5)$$

Por razones de confiabilidad, se recomienda tomar ocho pares de lecturas, divididas en dos grupos de cuatro.

- 1a. Lectura a voltaje nominal.
- 2a. Lectura al 90% del voltaje nominal.
- 3a. Lectura al 80% del voltaje nominal.
- 4a. Lectura al 70% del voltaje nominal.

Posteriormente se intercambian los voltímetros para compensar errores de los aparatos, y se repite la serie de cuatro lecturas.

La frecuencia de la tensión de prueba debe ser nominal o mayor.

Cuando la relación por comprobar es de valor elevado, de tal manera que no se puedan conectar directamente voltímetros de la misma escala, debe incluirse un transformador de potencial, pues es requisito que los aparatos sean iguales para poderse intercambiar.

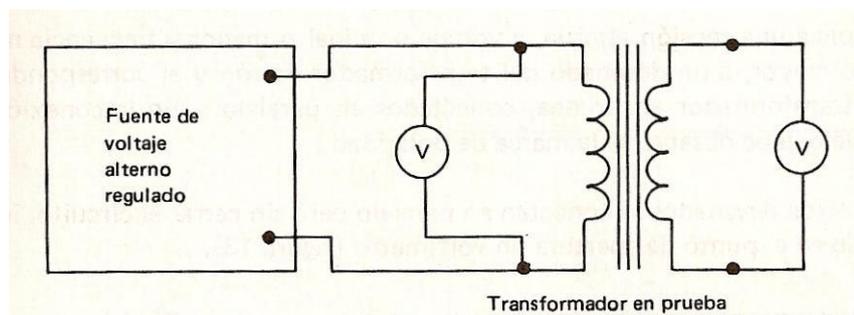


Figura 3.5 Diagrama de circuito para el método de los dos voltímetros.

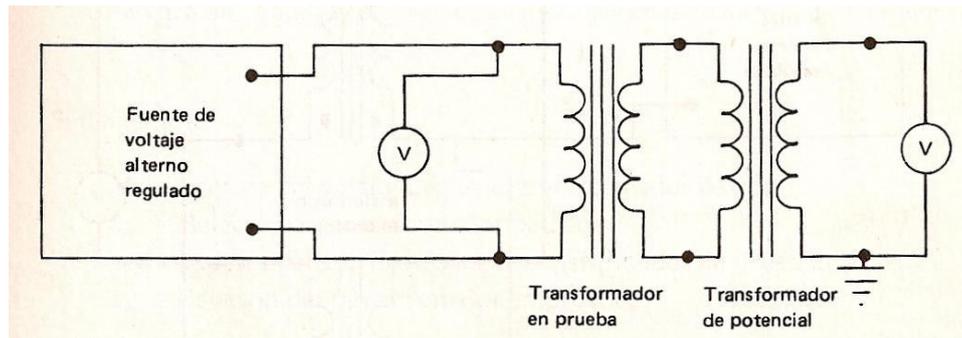


Figura 3.6 Diagrama de circuito para el método de los dos voltímetros con transformador de potencial.

La relación se calcula para cada par de lecturas. Si los resultados no difieren más del 1%, la prueba es aceptable y se toma como relación de transformación, el promedio de todos los resultados.

Si la diferencia es mayor del 1%, es necesario repetir la prueba con otros instrumentos.

3.3.2 Método del transformador patrón.

Para este método se dispone de un transformador cuya relación de transformación es conocida, y por comparación, se obtiene la relación del transformador en prueba. Los transformadores patrón podemos clasificarlos en dos grupos:

Transformador patrón de relación constante

Transformador patrón de relación variable (TTR).

El transformador patrón de relación constante nos permite verificar que el transformador en prueba se apegue a la misma relación del patrón.

Se aplica una tensión alterna, a voltaje nominal o menor y frecuencia nominal o mayor, a un devanado del transformador patrón y al correspondiente del transformador en prueba, conectados en paralelo. (En la conexión en paralelo debe observarse la marca de polaridad.)

Los otros devanados se conectan en paralelo pero sin cerrar el circuito, incluyendo en el punto de apertura un voltmetro (figura 3.6).

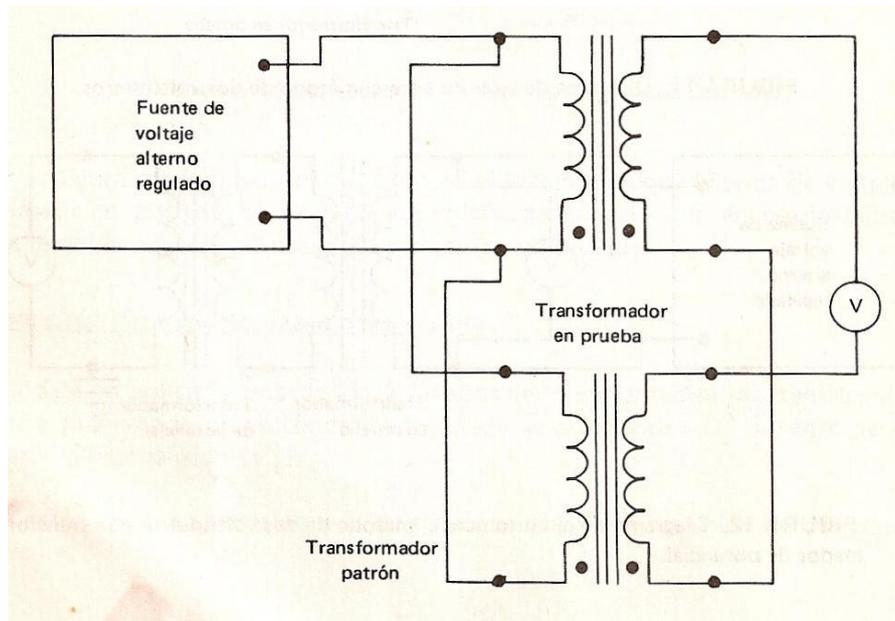


Figura 3.7 Diagrama de circuito para la prueba de relación de transformación con transformador patrón.

Si el voltmetro marca cero, significa que la relación del transformador en prueba es la deseada; en caso de marcar alguna otra lectura, significa que el transformador en prueba no da el voltaje que se pretende.

Cuando la relación del transformador en prueba es diferente a la del transformador patrón, pero esta diferencia es pequeña se puede valorar haciendo una combinación de este método con el de los dos voltmetros, según muestra la figura 3.8.

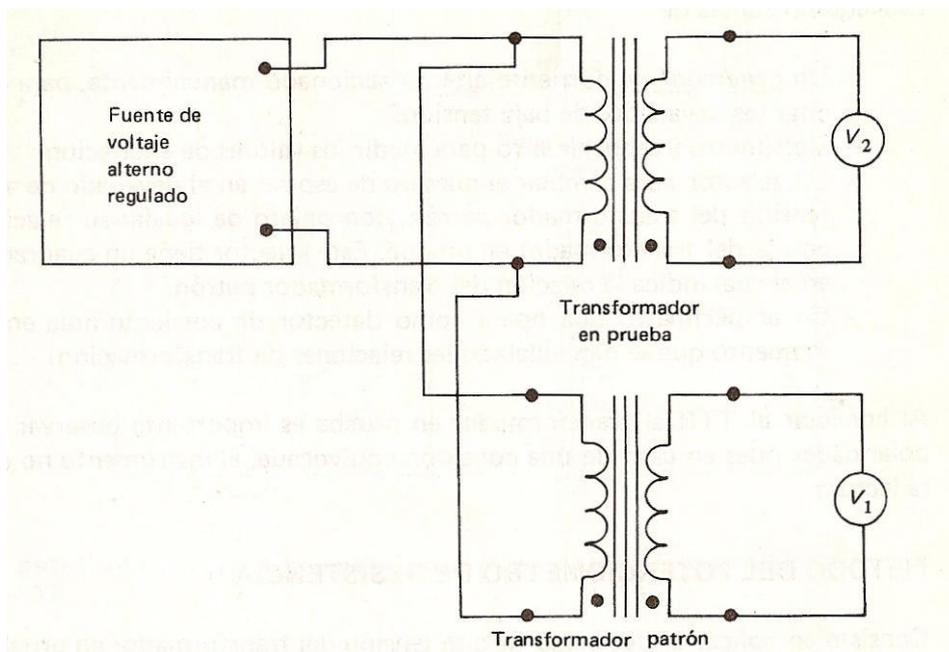


Figura 3.8 Diagrama de circuito para otra alternativa del método del transformador patrón.

Si llamamos:

V_1 = Lectura del voltmetro en el transformador patrón.

r_p = Relación del transformador patrón.

V_2 = Lectura del voltmetro en el transformador en prueba.

r_x = Relación del transformador en prueba.

En vista de que ambos transformadores tienen el mismo voltaje de excitación:

$$rV_1 = r_x V_2 \quad (3.6)$$

De donde la relación en prueba será:

$$r_x = \frac{V_1}{V_2} r_p \quad (3.7)$$

Como se trata de una combinación del método de dos voltímetros y del método de transformador patrón, es necesario efectuar esta prueba con cuatro lecturas a diferentes tensiones y luego otras cuatro después de intercambiar instrumentos igual que se describió en el primer método.

El transformador patrón con relación variable, conocido comercialmente con las siglas TTR (Transformer Turn-Ratio), es un instrumento que nos permite medir cualquier relación de transformación dentro de una escala de valores muy amplia.

Este equipo consta de:

- Un generador de corriente alterna accionado manualmente, para excitar los devanados de baja tensión.
- Voltímetro y amperímetro para medir los valores de excitación.
- Un selector para cambiar el número de espiras en el devanado de alta tensión del transformador patrón, con objeto de igualar su relación con la del transformador en prueba. Este selector tiene un cuadrante en el cual indica la relación del transformador patrón.
- Un amperímetro que opera como detector de corriente nula en el momento que se han igualado las relaciones de transformación.

Al conectar el TTR al transformador en prueba es importante observar las polaridades pues en caso de una conexión equivocada, el instrumento no dará lectura.

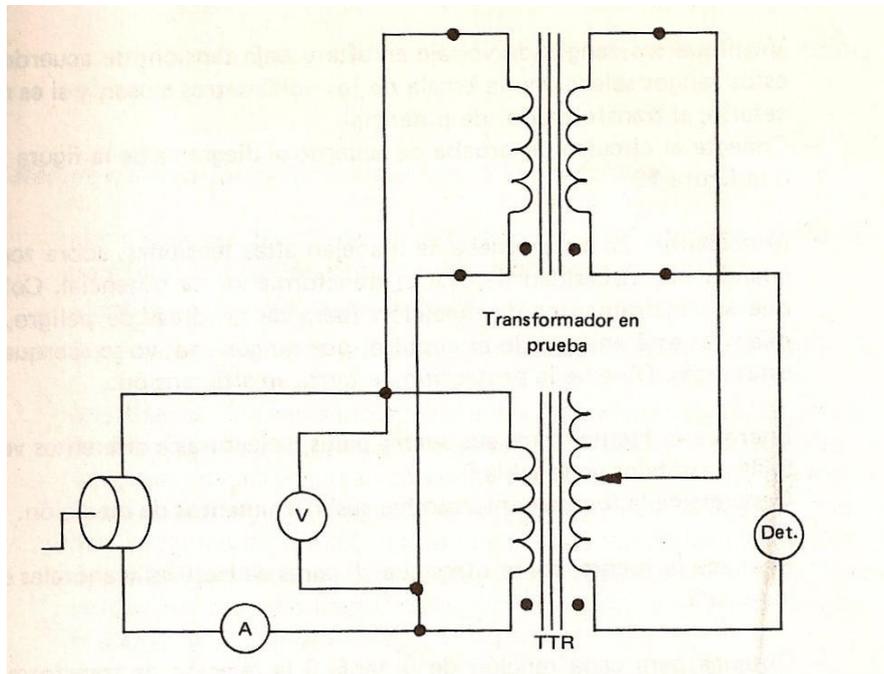


Figura 3.9 Diagrama de circuito para la prueba de relación de transformación con TTR.

3.3.3 Método del potenciómetro de resistencia.

Consiste en aplicar al devanado de alta tensión del transformador en prueba, un voltaje alterno, y mediante interconexiones con el devanado de baja tensión a través de un potenciómetro, detectar una posición de éste en el que se anulen las corrientes circulantes, como se muestra en la figura 3.10.

Se requiere un potenciómetro adecuado, que no sufra calentamiento con el voltaje aplicado y que tenga una graduación precisa de la resistencia variable. Al deslizar el contacto móvil, debe aparecer una posición en donde el detector marque corriente nula. Para esta posición, la relación de transformación será:

$$r = \frac{R}{R_1} \quad (3.8)$$

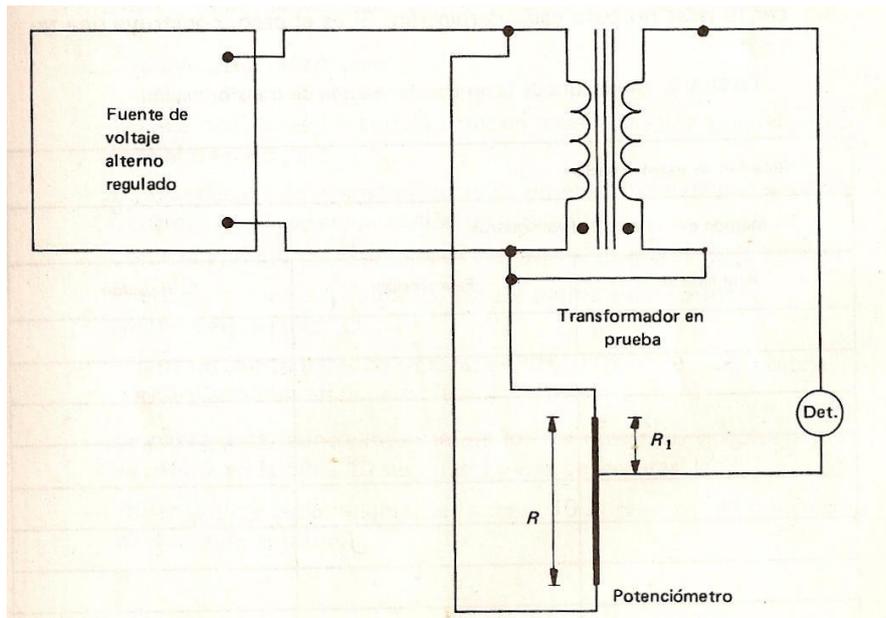


Figura 3.10 Diagrama de circuito para el método del potenciómetro de resistencia.

3.4 Polaridad o secuencia de fases.

En los transformadores monofásicos es factible identificar entre sus cuatro terminales (dos de alta tensión y dos de baja tensión), dos de ellas que corresponden a la misma polaridad; en cambio en transformadores trifásicos que tienen de seis a ocho terminales según el tipo de conexiones, resulta bastante confuso identificar pares de terminales de misma polaridad instantánea, por lo que en este caso se recurre al concepto de secuencia de fases.

Por lo anterior podemos concluir que el concepto de polaridad se asocia a los transformadores monofásicos, y el de secuencia de fases a los transformadores trifásicos.

3.4.1 Prueba de polaridad.

En los transformadores monofásicos, además de identificar una terminal de alta tensión con una de baja tensión que tengan misma polaridad, la posición relativa de estas terminales en el arreglo global se identifica con la nomenclatura que damos en la siguiente.

Regla de aplicación. Cuando el observador se coloca frente a las dos terminales de baja tensión, si H_1 queda a su izquierda y X_1 a su derecha se dice que el transformador tiene polaridad aditiva, y si H_1 y X_1 quedan a su izquierda se dice que tiene polaridad sustractiva (H_1 y X_1 son terminales de misma polaridad). Esta regla se ilustra en la figura 3.11.

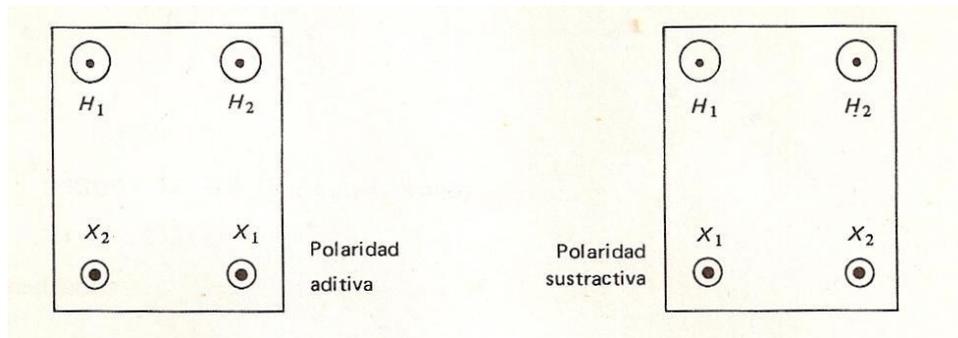


Figura 3.11 Nomenclatura de polaridad de acuerdo al orden de colocación de las terminales.

Para verificar la polaridad de los transformadores se recomiendan tres métodos:

- a) Método del transformador patrón.
- b) Método de dos voltímetros
- c) Método de descarga inductiva.

3.4.2 Método del transformador patrón

El transformador patrón en cualquiera de sus dos modalidades vistas en la prueba No. 3, además de proporcionarnos la relación de transformación, debe tener la identificación de su polaridad, de manera que al interconectarlo con el transformador en prueba, también identificamos la polaridad de este.

3.4.3 Método de dos voltímetros

Este método resulta muy interesante, porque además de su sencillez, presenta muy claramente una justificación a la nomenclatura de polaridad que hemos establecido anteriormente.

Consiste en aplicar al devanado de alta tensión un voltaje alterno de valor nominal o menor. El observador, colocado frente a las terminales de baja tensión, debe puentear previamente las dos terminales de su izquierda, y colocar dos voltímetros, uno entre las terminales de alta tensión y otro entre las terminales de su derecha, como muestra la figura 3.12.

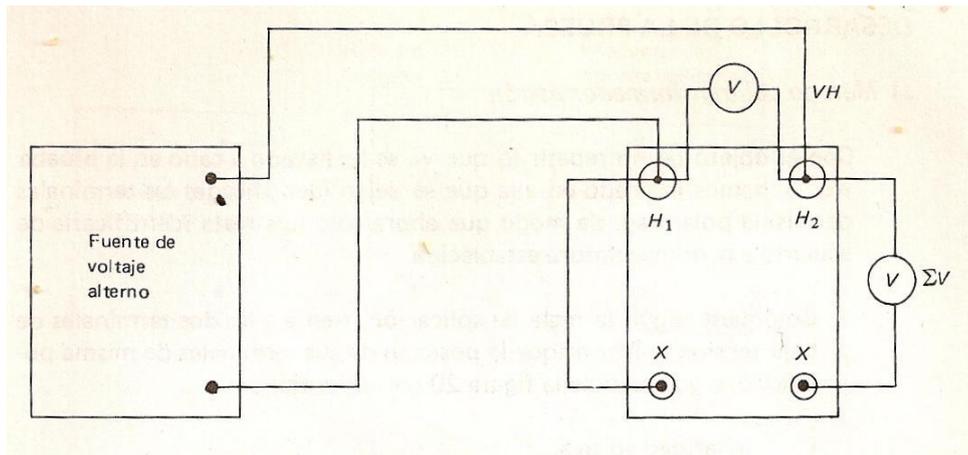


Figura 3.12 Diagrama de circuito para la prueba de polaridad con dos voltmetros.

Si convenimos en que el voltmetro colocado en alta tensión da una lectura V_H , y el voltmetro colocado entre alta y baja tensión da la suma algebraica de voltajes ΣV , entonces:

Si $\Sigma V > V_H$ la polaridad es aditiva.

Si $\Sigma V < V_H$ la polaridad es sustractiva.

En la figura 3.12 hemos supuesto desconocidos, los subíndices en la identificación de baja tensión. Como resultado de esta prueba, debe identificarse la posición de estos subíndices de acuerdo a la figura 3.11.

3.4.4 Método de la descarga inductiva

Este método consiste en aplicar corriente directa a uno de los devanados, cuidando de no exceder el valor nominal. El observador, colocado frente a las dos terminales de baja tensión, por medio de un voltmetro de corriente directa debe averiguar la polaridad de la tensión aplicada, de tal manera que la aguja del instrumento se desvíe hacia la región positiva de la caratula, como muestra la figura 3.13a.

Posteriormente, sin suspender la corriente directa aplicada, se cambia la conexión del voltmetro que se tiene del lado izquierdo, a la terminal del devanado opuesto del mismo lado izquierdo, y lo mismo la conexión del lado derecho. Después de esta operación se suspende bruscamente la corriente directa y se observa la deflexión momentánea de la aguja del voltmetro debida a la descarga inductiva como muestra la figura 3.13b.

Si la aguja se desvía en sentido positivo, la polaridad es aditiva, y si se desvía en sentido negativo, la polaridad es sustractiva.

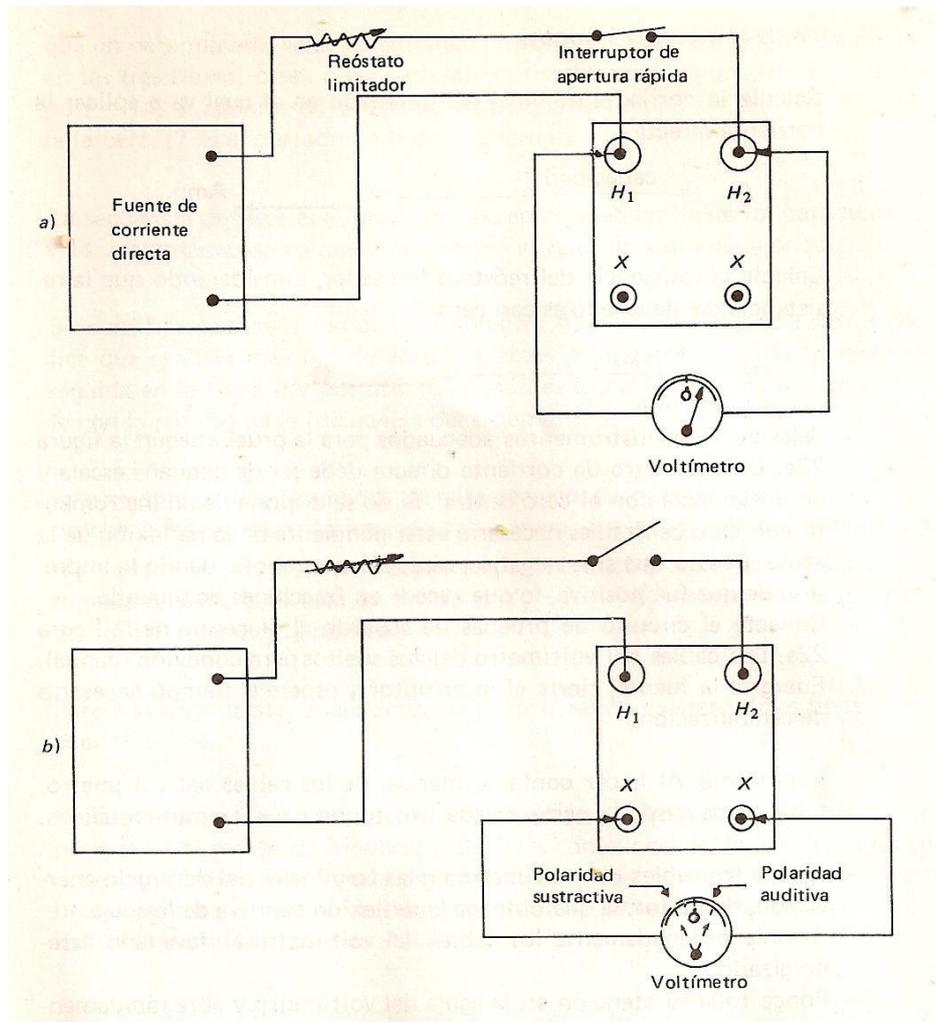


Figura 3.13 Diagrama de circuito y observación de la desviación de la aguja en la prueba de polaridad por descarga inductiva.

3.4.5 Prueba de secuencia de fases

Un sistema trifásico de voltajes es un conjunto de tres tensiones alternas de misma magnitud y frecuencia y desfasada entre sí 120 grados. Esto implica que un determinado valor instantáneo de voltaje no aparece simultáneamente en las tres líneas, o sea que se presenta primeramente en una línea, un tiempo $t = 1/3 T$ aparece en la segunda línea, y otro tiempo $t = 2/3 T$ aparece en la tercera. (T es el periodo de la onda alterna.)

La secuencia de fases es el orden en que aparece en las líneas un determinado valor instantáneo de voltaje, por ejemplo el valor máximo de la onda.

Si identificamos las líneas con los nombres A, B y C, la secuencia ABC significa que el valor máximo de voltaje aparece primeramente en la línea A, en seguida

en la línea B y por último en la línea C y así se repite constantemente con la rapidez de la frecuencia del sistema.

Si conectamos los devanados de alta tensión de nuestro transformador en prueba a las líneas trifásicas, de tal manera que se le aplique la secuencia

$H_1 - H_2 - H_3$, en el lado de baja tensión se inducirán voltajes con una determinada secuencia. Si esta secuencia es $X_1 - X_2 - X_3$, se dice que el transformador tiene secuencia normal.

Para averiguar la secuencia de un sistema trifásico existen varios tipos de secuencímetros.

Secuencímetro indicador. Es un instrumento de prueba que trabaja con el principio del motor de inducción. Sus tres conexiones están identificadas en orden, y cuando la secuencia del sistema al que se conecta tiene ese mismo orden, se observe que el indicador de caratula gira en sentido positivo según indicaciones de la misma caratula.

Secuencímetro de dos resistencias y un capacitor. Es posible confeccionar un secuencímetro en el propio laboratorio con dos lámparas incandescentes (cuyo filamento es resistivo puro) y un capacitor conectado en circuito estrella. Al energizar este circuito en un sistema trifásico se observe que una lámpara prende más que la otra. Su secuencia será: lámpara brillante - lámpara opaca - capacitor.

Secuencímetro de dos resistencias y un inductor. También se puede confeccionar un secuencímetro similar al anterior, pero en vez de capacitor se incluye un inductor, y en este caso la secuencia será: lámpara opaca - lámpara brillante - inductor.

Motor de inducción. Un motor trifásico de inducción puede servir como secuencímetro si previamente se identifica el orden de sus conexiones con un sentido de giro.

3.5. Desplazamiento angular y verificación del diagrama fasorial.

Las pruebas de relación de transformación y secuencia de fases se han llevado a cabo en base al diagrama fasorial de conexiones del transformador trifásico, y son complementadas con esta prueba que tiene por objeto verificar el diagrama mencionado, y del mismo, obtener el desplazamiento angular. Para verificar el diagrama, se aplica al lado de alta tensión un sistema trifásico de voltajes, de un valor adecuado para tomar lecturas con un voltmetro, interconectando a la vez una terminal de alta tensión con una de baja tensión, ge-

neralmente H_1 con X_1 como lo indican las tablas de la figura 3.14 y 3.15 para los diferentes casos de diagramas.

Se toman las lecturas indicadas en la columna derecha de las mismas tablas y se verifican las relaciones de tensión que ahí mismo aparecen. Si las relaciones se cumplen queda verificado el diagrama supuesto.

Por último, para obtener el desplazamiento angular, observamos que en todos los diagramas aparece un fasor de alta tensión $H_0 - H_1$ y uno de baja tensión $X_0 - X_1$. (En el caso de conexiones en delta se supone un neutro virtual y el fasor aparece con línea punteada.)

Si a un lado del diagrama de conexiones transportamos los fasores $H_0 - H_1$ y $X_0 - X_1$ con un origen común y suponemos ahora que este sistema gira en el sentido convencional (contrario al movimiento de las manecillas de un reloj), el segundo fasor que pase por un punto del plano, se dice que está atrasado con respecto al primero.

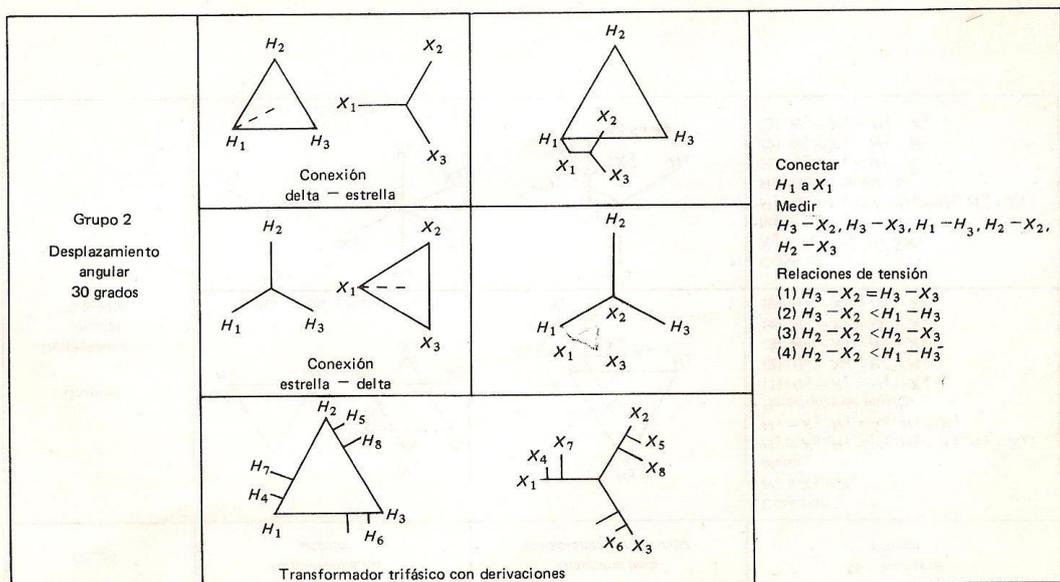


Figura 3.14 Marcado de terminales y diagramas de secuencia de fases para conexión trifásica de transformadores.

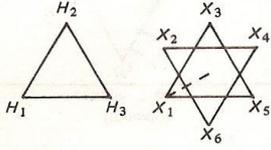
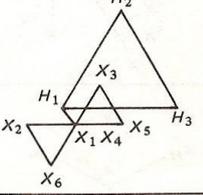
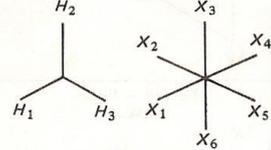
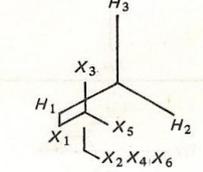
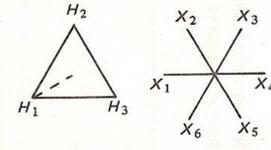
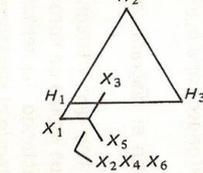
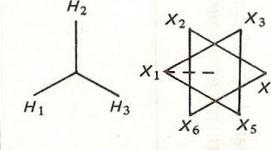
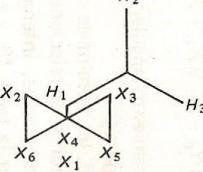
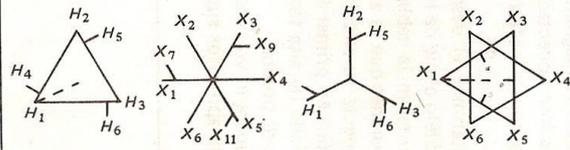
Grupo	Desplazamiento angular	Diagrama para mediciones para prueba	Mediciones de prueba
Grupo 1 Desplazamiento angular 0 grados	 <p>Delta - doble delta</p>		Conectar H_1 a X_1 y X_4 Medir $H_2 - X_3, H_1 - H_2, H_2 - X_5, H_2 - X_6, H_3 - X_2, H_2 - X_2, H_3 - X_3$ Relaciones de tensión (1) $H_2 - X_5 = H_3 - X_3$ (2) $H_2 - X_3 < H_1 - H_2$ (3) $H_2 - X_3 < H_2 - X_5$ (4) $H_2 - X_6 = H_3 - X_2$ (5) $H_2 - X_6 > H_1 - X_6$
	 <p>Estrella - diametral</p>		Conectar X_2 a X_4 y X_6, H_1 a X_1 Medir $H_2 - X_3, H_3 - X_5, H_1 - H_2, H_2 - X_5$ Relaciones de tensión (1) $H_2 - X_5 = H_3 - X_3$ (2) $H_2 - X_3 < H_1 - H_2$ (3) $H_2 - X_3 < H_2 - X_5$
Grupo 2 Desplazamiento angular 30 grados	 <p>Delta - diametral</p>		Conectar X_2 a X_4 y X_6, H_1 a X_1 Medir $H_3 - X_3, H_3 - X_5, H_1 - H_3, H_1 - H_3, H_2 - X_3, H_2 - X_5$ Relaciones de tensión (1) $H_3 - X_3 = H_3 - X_5$ (2) $H_3 - X_3 < H_1 - H_3$ (3) $H_2 - X_3 < H_2 - X_5$
	 <p>Estrella - doble delta</p>		Conectar H_1 a X_1 y X_4 Medir $H_3 - X_3, H_3 - X_5, H_1 - H_3, H_2 - X_3, H_2 - X_5, H_3 - X_2, H_3 - X_6, H_2 - X_2, H_2 - X_6$ Relaciones de tensión (1) $H_3 - X_3 = H_3 - X_5$ (2) $H_3 - X_3 < H_1 - H_3$ (3) $H_2 - X_3 < H_2 - X_5$ (4) $H_3 - X_2 = H_3 - X_6$ (5) $H_3 - X_2 > H_1 - H_3$ (6) $H_2 - X_2 < H_2 - X_6$
	 <p>Transformadores exafásicos con derivaciones</p>		

Figura 3.15 Marcado de terminales y diagramas de secuencia de fases para conexión trifásica de transformadores.

Los transformadores conectados bajo especificaciones de norma deben cumplir con los siguientes requisitos de desplazamiento angular:

Conexiones delta-delta y estrella-estrella, baja tensión en fase con alta tensión.

Conexiones delta-estrella y estrella-delta, baja tensión 30 grados atrás de alta tensión.

3.6 Pérdidas magnéticas y corriente de excitación

Al energizar un transformador en vacío, es decir con el secundario en circuito abierto, el transformador no entrega energía, y por tanto, desde un punto de vista teórico e ideal, no debería tampoco consumir energía, pues equivale a conectar una inductancia pura, en donde la corriente circulante estaría desfasada 90 grados con respecto al voltaje. De esta manera, la potencia real sería.

$$P = VI \cos 90 = 0 \quad (3.9)$$

Sin embargo, el caso práctico difiere del real debido a dos condiciones del núcleo, que son:

- Curva de histéresis, que en los casos reales no es posible reducir su área a cero
- Circulación de corrientes parasitas (llamadas también de Eddy o de Foucault) que no es posible eliminar, dado que el acero del núcleo es conductor eléctrico.

Las pérdidas magnéticas se miden prácticamente, excitando el transformador por cualquiera de sus devanados, a voltaje y frecuencia nominales y con una onda senoidal (sin distorsión), mientras que el otro embobinado permanece en circuito abierto. Se incluyen en el circuito de alimentación, los siguientes instrumentos.

- Un frecuencímetro.
- Un amperímetro si el transformador es monofásico, o tres si es trifásico.
- Un wattmetro si el transformador es monofásico, dos ó tres si es trifásico.
- Un voltmetro de valor eficaz.
- Un voltmetro de tensión media, tipo rectificador, de preferencia con escala graduada a valores eficaces.
- En caso de que los valores por medir sean superiores a las escalas de los aparatos se incluyen transformadores de corriente y/o potencial.

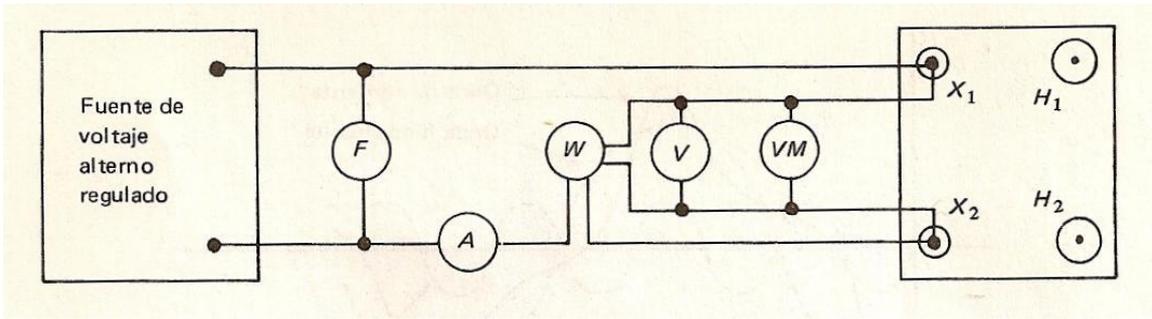


Figura 3.18 Diagrama de circuito para la prueba de pérdidas magnéticas en un transformador monofásico.

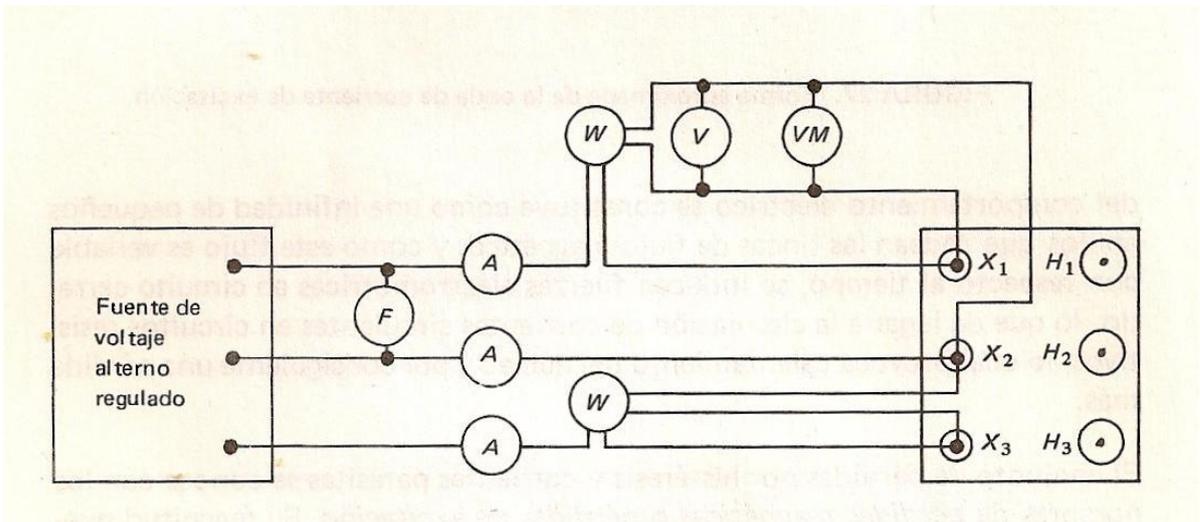


Figura 3.19 Diagrama de circuito para la prueba de pérdidas magnéticas por el método de dos wattmetros en un transformador trifásico sin neutro (conexión delta).

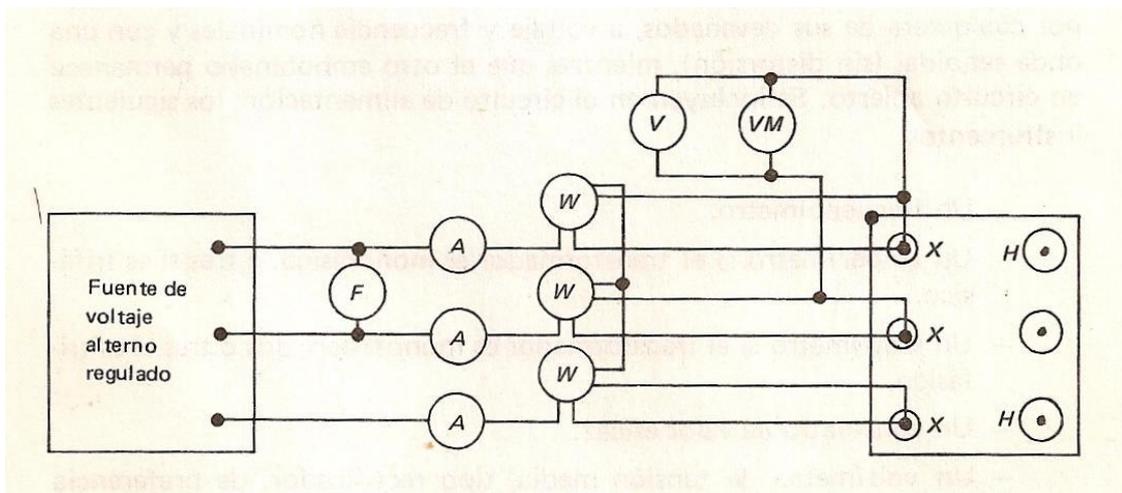


Figura 3.20 Diagrama de circuito para la prueba de pérdidas magnéticas por el método de los tres wattmetros con neutro flotante en un transformador trifásico sin neutro (conexión delta).

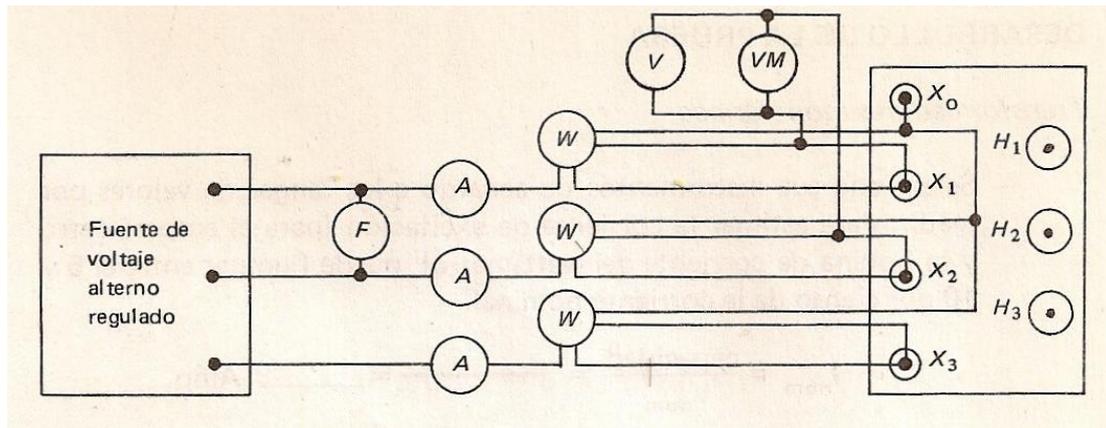


Figura 3.21 Diagrama de circuito para la prueba de pérdidas magnéticas por el método de los tres wattmetros con neutro flotante en un transformador trifásico con neutro accesible.

La prueba se desarrolla aplicando al transformador su voltaje nominal. Para cerciorarnos que la onda de voltaje es senoidal la lectura de los dos voltímetros no debe diferir más del 1% en el caso de que el voltmetro tipo rectificador tenga graduada su escala en función de los valores eficaces de onda senoidal, o bien, la lectura del voltmetro eficaz y la lectura del voltmetro tipo rectificador multiplicados por 1.11 en el caso de que este último tenga su escala graduada directamente en valores medios.

Habiendo verificado por medio de los aparatos que se aplican la frecuencia y el voltaje nominal y no existe distorsión de onda, los resultados de la prueba se obtienen de la manera siguiente:

Para transformadores monofásicos, la lectura del wattmetro nos da las pérdidas magnéticas la lectura del amperímetro nos da la corriente de excitación.

Para transformadores trifásicos con el método de dos wattmetros, la suma algebraica de watts nos da las perdidas magnéticas (recordamos que si el factor de potencia es bajo, una de las lecturas es negativa) y el promedio de lecturas de los amperímetros nos da la corriente de excitación. Se recomienda en este método efectuar tres pruebas, cambiando los wattmetros de línea de modo que las tres líneas operen sucesivamente como línea común en las bobinas de potencial de los aparatos.

Por las razones expuestas, el método de dos wattmetros es poco recomendable, prefiriéndose el método de tres wattmetros como indican las figuras 3.20 y 3.21.

Para transformadores trifásicos con el método de tres wattmetros, la suma aritmética de watts nos da las perdidas magnéticas, y el promedio de lecturas de los amperímetros nos da la corriente de excitación.

3.7 Pérdidas eléctricas y porcentaje de impedancia.

El transformador en operación es afectado por dos conjuntos de pérdidas, las magnéticas y las eléctricas. Las primeras las hemos tratado en la prueba No. 6, y ahora nos ocuparemos de las segundas.

Cuando circulan corrientes por los devanados del transformador (y para la prueba que ahora iniciamos nos interesan en particular las intensidades nominales), debido a que tienen una cierta resistencia, como vemos en la prueba No. 1, los devanados sufren un calentamiento, cuya energía se disipa al medio ambiente, constituyendo una pérdida.

Estas pérdidas se conocen como pérdidas eléctricas o pérdidas de carga. Su magnitud sin embargo, no podemos calcularla como la suma de productos $I^2 R$ (en donde I son las corrientes nominales de cada devanado y R su respectiva resistencia óhmica medida en la prueba No. 1), dado que cuando circula una corriente alterna por un conductor, tiende a debilitarse en el centro del mismo y en cambio se intensifica hacia la región periférica, lo que ocasiona que la resistencia efectiva a la corriente alterna sea mayor que la resistencia óhmica, y por tanto las pérdidas de carga son mayores que la suma de productos $I^2 R$.

Por tanto, podemos considerar que las pérdidas de carga (P) tienen dos componentes, una por suma de productos $I^2 R$ que serían las pérdidas óhmicas (P_r) y otra que constituyen las pérdidas indeterminadas (P_i).

$$P = P_r + P_i \quad (3.10)$$

Es necesario entonces, medir por medio de una prueba, el monto de las pérdidas de carga para poder conocer su valor.

La prueba se efectúa poniendo en circuito-corto el lado de baja tensión, y alimentando por el lado de alta tensión un voltaje reducido de tal valor que se haga circular la corriente nominal a la frecuencia nominal.

De esta manera logramos que circule en todos los embobinados su respectiva corriente nominal. La potencia que consume el transformador en estas condiciones, representa las pérdidas eléctricas.

Usualmente el voltaje de alimentación está comprendido entre uno y el quince por ciento del voltaje nominal.

Los aparatos de medición se incluyen en el circuito de alimentación, y son:
Para transformadores monofásicos:

- Un frecuencímetro
- Un amperímetro
- Un wattmetro
- Un voltmetro de valor eficaz

Para transformadores trifásicos:

- Un frecuencímetro
- Tres amperímetros
- Dos ó tres wattmetros
- Un voltmetro de valor eficaz

El Puente para poner en circuito-corto el lado de baja tensión debe ser de sección igual o mayor que la de las terminales correspondientes; debe ser lo más corto posible y no atravesar campos magnéticos. Las terminales deben estar limpias y apretadas, y no deben incluir aparatos de medición, pues podrían involucrar errores en los resultados.

Efecto térmico

Cuando un conductor se calienta, aumenta su desorden molecular, lo que motive una mayor dificultad al flujo de corriente, pero a la vez una repartición más uniforme de esta respecto a la sección transversal, cuando se trata de corriente alterna.

Lo anterior se manifiesta en un aumento de la resistencia óhmica, y por tanto un aumento en las pérdidas óhmicas, y a la inversa, una disminución en las pérdidas indeterminadas.

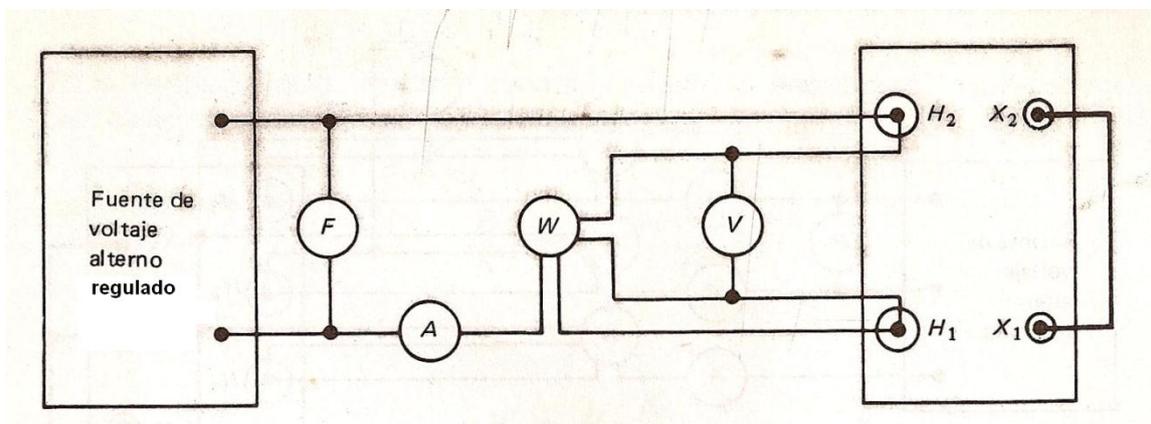


Figura 3.22 Diagrama de circuito para la prueba de pérdidas eléctricas en un transformador monofásico.

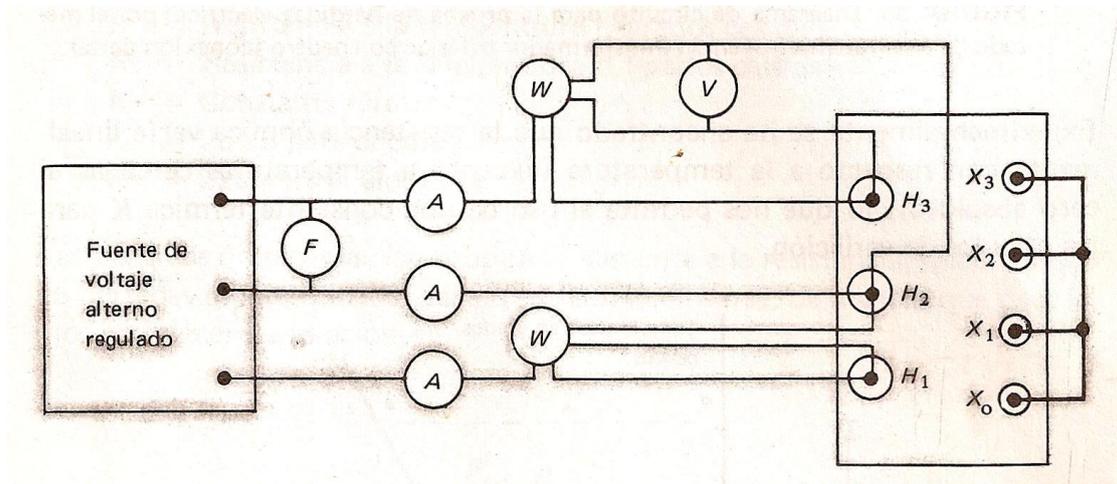


Figura 3.23 Diagrama de circuito para la prueba de pérdidas eléctricas por el método de dos wattmetros en un transformador trifásico sin neutro (conexión delta).

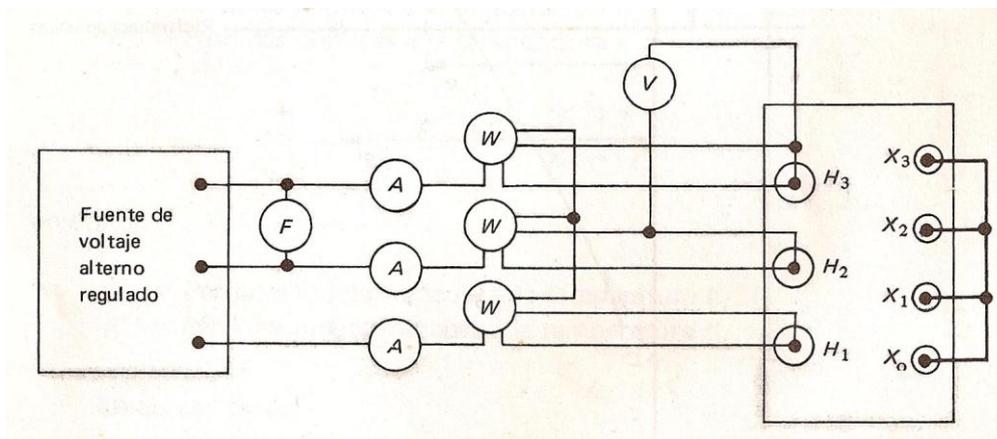


Figura 3.24 Diagrama de circuito para la prueba de pérdidas eléctricas por el método de tres wattmetros en un transformador trifásico sin neutro (conexión delta).

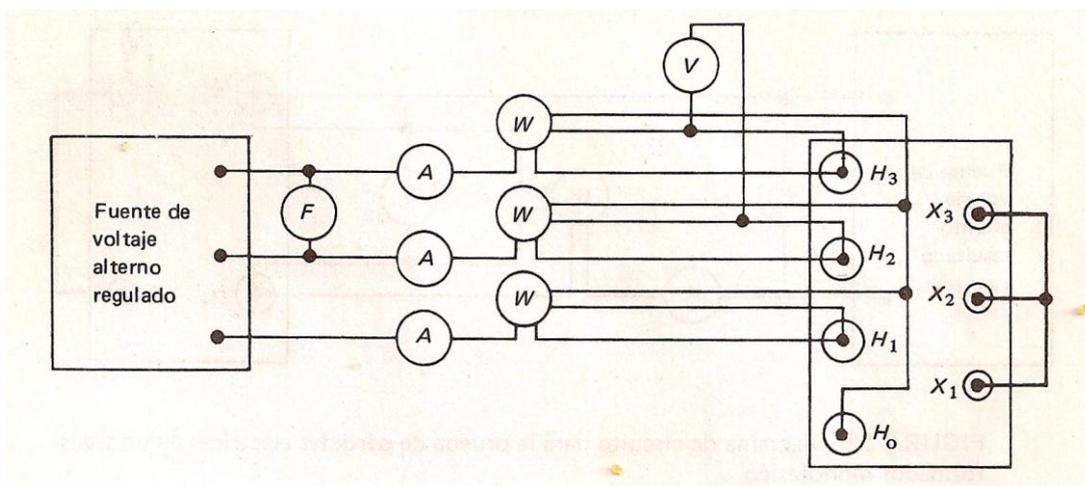


Figura 3.25. Diagrama de circuito para la prueba de pérdidas eléctricas por el método de tres wattmetros en un transformador trifásico con neutro (conexión delta).

Experimentalmente se ha encontrado que la resistencia óhmica varía linealmente con respecto a la temperatura (excepto a temperaturas cercanas al cero absoluto), lo que nos permite el uso de una constante térmica K para los cálculos de variación.

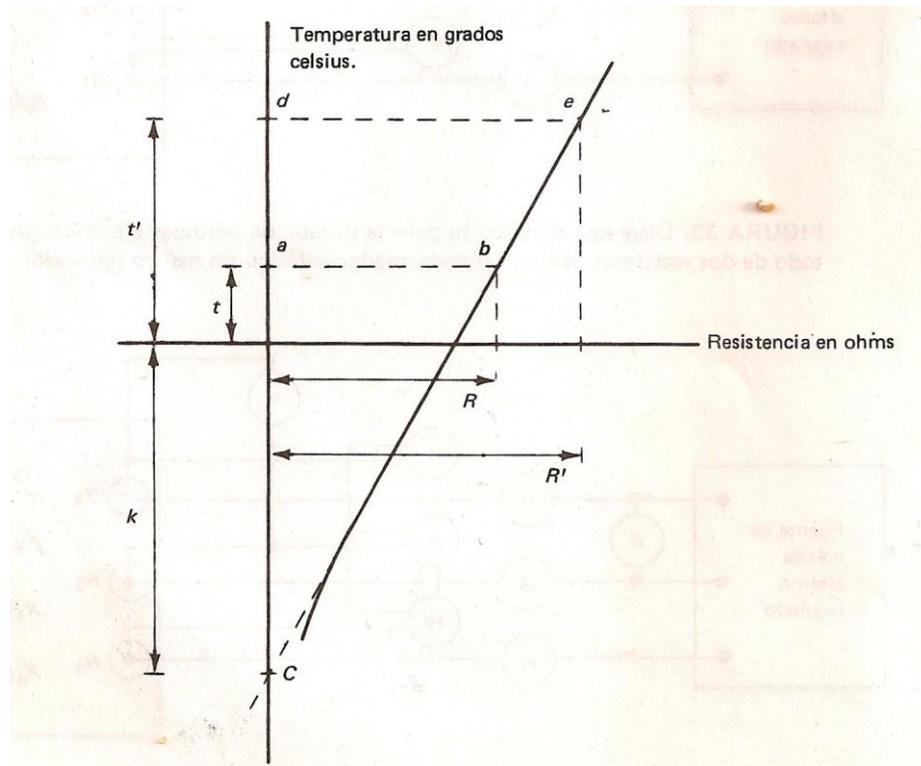


Figura 3.26 Gráfica de la variación de resistencia con respecto a temperatura.

En la figura 3.26, si tomamos en cuenta la semejanza entre los triángulos abc y dec podemos establecer la proporción de lados homólogos.

$$\frac{R'}{R} = \frac{K + t'}{K + t} \quad (3.10)$$

Por tanto:

$$R' = R \frac{K + t'}{K + t} \quad (3.11)$$

En donde:

R = Resistencia a la temperatura t (grados Celsius)

R' = Resistencia a la temperatura t' (grados Celsius)

K = Constante térmica = 234.5 para el cobre = 225 para el aluminio

Las pérdidas óhmicas varían proporcionalmente a la resistencia, mientras las pérdidas indeterminadas varían en relación inversa de manera que podríamos establecer las relaciones:

$$P'_R = P_r \frac{K + t'}{K + t} \quad (3.12)$$

En donde:

P_r = Pérdidas óhmicas a la temperatura t .

P'_r = Pérdidas óhmicas a la temperatura t' .

$$P'_i = P_i \frac{K + t'}{K + t} \quad (3.13)$$

En donde:

P_i = Pérdidas indeterminadas a la temperatura t .

P'_i = Pérdidas indeterminadas a la temperatura t' .

En ambos casos

t = Temperatura a la que se efectúa la prueba

t' = Temperatura a la que se deben referir las pérdidas en la prueba número 8.

Inicialmente

$$P = P_r + P_i \quad (3.14)$$

Y cuando el transformador se ha calentado a su temperatura de elevación,

$$P' = P'_r + P'_i \quad (3.15)$$

Las pérdidas óhmicas (suma de productos I^2R) se calculan a partir de las corrientes nominales de cada devanado y su respectiva resistencia óhmica mediante la prueba No. 1. Si la temperatura a la que se efectuó la prueba No. 1 difiere a la temperatura la prueba No.7, es necesario calcular el nuevo valor de las resistencias óhmicas.

Las pérdidas indeterminadas se obtienen restando las pérdidas óhmicas de las pérdidas de carga obtenidas en la prueba No. 7.

3.7.1 Porcentaje de impedancia

Este es un parámetro del transformador muy útil para el análisis de su comportamiento cuando se integra a un sistema eléctrico, y para el cálculo de la corriente de corto circuito.

Su valor se puede obtener en esta prueba de una manera sencilla, según la siguiente fórmula:

$$\% Z = \frac{\text{Voltaje de prueba}}{\text{Voltaje nominal}} \times 100 \quad (3.16)$$

Este parámetro debe de estar incluido en las especificaciones de placa del transformador, y el objeto de calcularlo en esta prueba es verificar su valor.

Además, cuando encontramos esta especificación en la placa, nos permite estimar el voltaje de prueba para efecto de selección de instrumentos.

$$V_{Pr} = \frac{\% Z}{100} V_{nom} \quad (3.17)$$

3.8 Elevación de la temperatura

Esta prueba consiste en operar el transformador en condiciones de plena carga durante un tiempo prolongado, con el fin de verificar si puede cumplir con la capacidad especificada.

Las pérdidas magnéticas y eléctricas producen calentamiento en los elementos del transformador. Mientras la energía producida por estos efectos sea mayor que la energía disipada por el sistema de enfriamiento, la temperatura estará en constante aumento, hasta llegar finalmente a un punto de equilibrio.

Los aislamientos de los embobinados son los principales afectados, puesto que con el calentamiento están expuestos a un proceso de degradación, lo que redundará en la vida útil del equipo.

Si al trabajar el transformador a sus condiciones nominales durante el tiempo de prueba, la temperatura en sus diversas partes (especialmente en los embobinados) no excede del valor permisible, puede garantizarse la duración del mismo.

El tiempo de prueba depende del tamaño del transformador, pudiendo prolongarse hasta 24 horas (o más) en transformadores de potencia de gran capacidad. Para determinar en qué momento puede darse por concluida la prueba, se considera que la temperatura se ha estabilizado cuando el gradiente aceite-ambiente no varía más de un grado durante un periodo de tres horas consecutivas. Esto implica que durante la prueba se toman lecturas periódicamente, tanto de la temperatura ambiente como de la temperatura de los elementos del transformador.

La prueba debe efectuarse para cada una de las capacidades especificadas en placa, bajo condiciones normales de enfriamiento y en locales sin corrientes de aire.

El transformador debe estar completamente ensamblado, incluyendo todos sus accesorios, y si es sumergible en líquido aislante debe estar lleno hasta el nivel indicado.

La temperatura ambiente debe determinarse por el promedio de cuando menos tres lecturas de termopares o termómetros distribuidos uniformemente alrededor del transformador. Deben estar colocados en recipientes adecuados, aproximadamente a la mitad de la altura del transformador y a una distancia de 1 a 2 metros del mismo, exentos de corrientes de aire o calentamiento debido a cualquier fuente externa.

La temperatura de los elementos del transformador (excepto los conductores) se determina mediante termopares o termómetros.

Para superficies el elemento indicado es el termopar, debidamente adherido a las mismas.

Para el aceite puede utilizarse indistintamente termopar o termómetro. Se considera suficientemente representativa la temperatura del nivel superior, para lo cual el elemento de medición debe estar sumergido aproximadamente 50 mm bajo la superficie.

La temperatura en los conductores de los devanados no es posible obtenerla por medición directa, y por tanto solamente se calcula su valor final, en función de la constante térmica y la variación de la resistencia óhmica, con el valor inicial de la prueba No. 1 y el valor final de una medición en el instante del corte de prueba.

Para medir la resistencia al final de la prueba, se requieren ciertos artificios, dado que el transformador se enfría rápidamente (en particular los devanados), y el tiempo que transcurre desde el instante en que se corta la energía hasta que se han retirado las conexiones y se instala el puente para tomar la lectura, es suficiente para que la medición obtenida difiera del valor al instante de corte.

El procedimiento a seguir abarca los siguientes pasos:

- 1.- Se prepara el puente para medición de la resistencia óhmica, y un cronometro. Entendemos por preparar el puente, colocarle sus cables de conexión, a fin de poderlo instalar en dos terminales del transformador previamente identificadas, y preparar una lectura algo superior a la de la prueba No.1.
- 2.- Se corta la energía y en ese mismo instante se arranca el cronometro.
- Rápidamente se retiran las conexiones del transformador y se instala el puente.
- Se hace la primera medición de la resistencia y se tome el tiempo en que se efectuó (R_1 y t_1).
- Se toman sucesivamente varias lecturas de resistencia y sus respectivos tiempos, durante un lapso de 5 a 10 minutos ($R_2 - t_2$, $R_3 - t_3$, etc.)
- En un sistema de coordenadas que tenga los tiempos como abscisa y las resistencias como ordenadas, se grafican los resultados anteriores y se continua esta gráfica con su misma curvatura hasta el tiempo cero.

Para mayor precisión, conviene exagerar la escala vertical, aunque el valor de cero ohms no coincide con el origen de coordenadas.

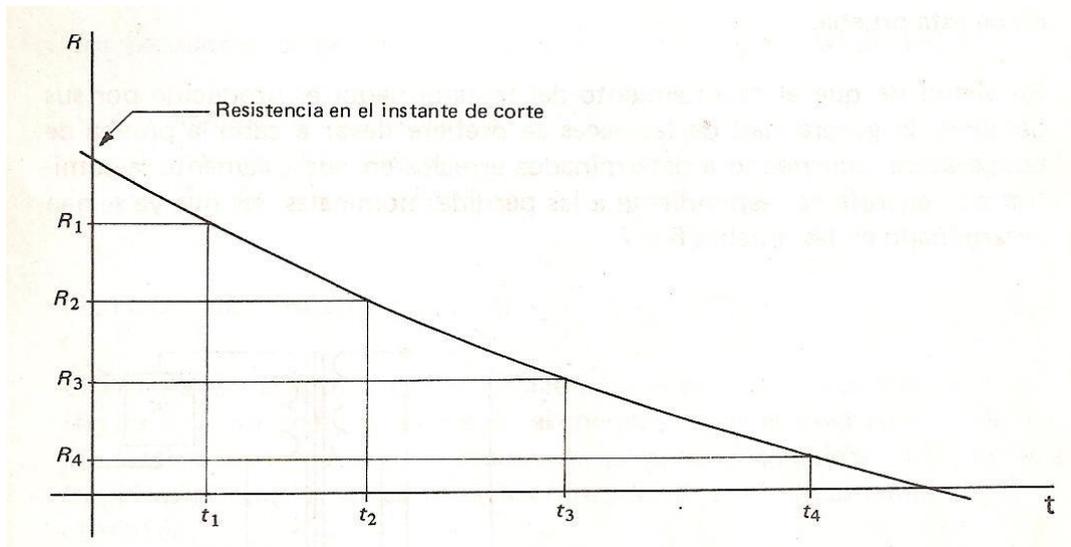


FIGURA 3.27 Grafica para estimar la resistencia en el instante del corte.

Con el valor de la resistencia en el instante de corte, se puede calcular la temperatura, despejando t' de la fórmula de variación térmica de la resistencia.

$$t' = \frac{R'}{R} (K + t) - K \quad (3.18)$$

En donde

t' = Temperatura del devanado en el instante de corte.

R' = Resistencia del devanado en el instante de corte.

t = Temperatura a la que se efectuó la prueba No. 1.

R = Resistencia medida en la prueba No. 1.

K = Constante térmica = 234.5 para el cobre = 225 para el aluminio.

Esta medición puede efectuarse en cualquier lado del transformador, ya sea alta o baja tensión, pero para efectuar la misma medición del otro lado es necesario reiniciar la prueba de temperatura, y después de cuando menos dos horas, hacer un segundo corte.

3.8.1 Carga del transformador

Un aspecto importante es la forma en que se le da carga al transformador, ya que para transformadores de cierta capacidad resulta problemático tanto un banco de carga real, como el costo de la energía utilizada, dado lo prolongado de esta prueba.

En virtud de que el calentamiento del transformador es producido por sus pérdidas, la generalidad de las veces se prefiere llevar a cabo la prueba de temperatura recurriendo a determinados arreglos en que solamente se suministre la energía correspondiente a las pérdidas nominales, las que ya se han determinado en las pruebas 6 y 7.

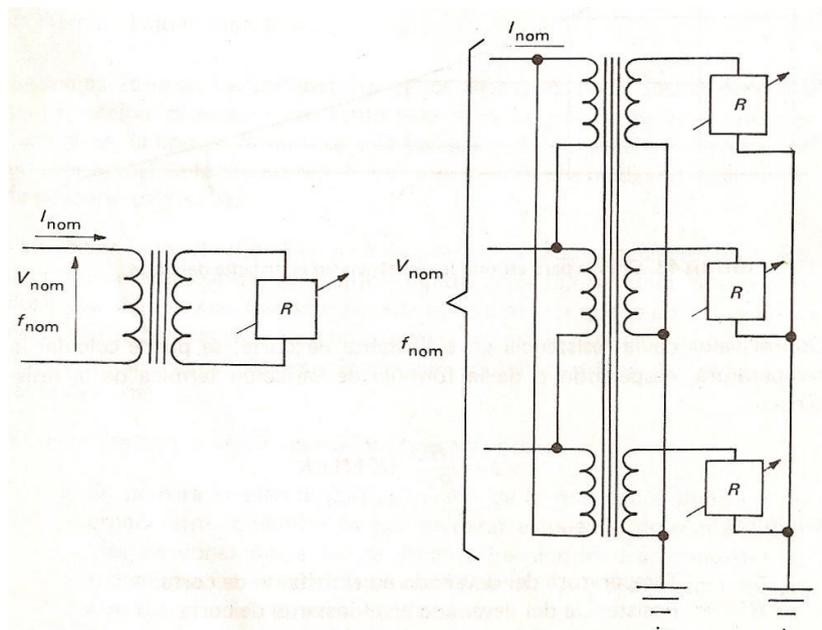


FIGURA 3.28 Conexión para dar carga real.

3.8.2 Método de carga real

Debe elegirse un lado del transformador que opere como primario, al cual le suministrara su voltaje y frecuencia nominales, mientras en el secundario se instala un banco de carga preferentemente resistivo, que haga circular la corriente nominal.

3.8.3 Métodos de carga simulada

Existen varios métodos tanto para transformadores monofásicos como trifásicos, con arreglos en los que se pueden producir as pérdidas nominales sin emplear la energía de la capacidad nominal del transformador.

Al producirse las pérdidas magnéticas y eléctricas nominales el comportamiento de la temperatura es idéntico al que se observaría con carga real.

Los métodos de carga simulada podemos clasificarlos en tres grupos:

- Método de corto-circuito
- Método de oposición
- Método de auto-oposición

3.8.3.1 Método de corto-circuito

El arreglo es idéntico al que se utilizó para la prueba de pérdidas eléctricas, Pero en este caso al energizar se debe tener cuidado de que los wattmetros marquen la suma de pérdidas magnéticas más pérdidas eléctricas nominales, estas últimas corregidas a la supuesta temperatura de operación.

Este método requiere de una cantidad pequeña de equipo y de energía y es adecuado tanto para transformadores grandes como pequeños. Es el recomendado para transformadores sumergidos en aceite.

La prueba se desarrolla de acuerdo a los siguientes pasos:

1. Se suministran las pérdidas totales y se toman lecturas periódicas, las temperaturas tanto ambiente como del nivel superior registrando en cada lectura la elevación de temperatura la del ambiente.
2. Cuando se ha obtenido la temperatura de estabilización se reduce la alimentación a corriente nominal y se prolonga la prueba para dos lecturas más, tomando la temperatura del aceite.
3. Después de dos horas se efectúa el corte y se toman la resistencia óhmica de un devanado.
4. Se restablecen las conexiones y se continúa la prueba a corriente nominal por dos horas más, tomando temperaturas del aceite.
5. Después de dos horas se efectúa un segundo corte y se toman las mediciones de la resistencia óhmica del otro devanado.

Con estos resultados se calculan las resistencias al instante de los respectivos cortes, así como las temperaturas que alcanzaron los devanados. A las temperaturas de los devanados se les resta la temperatura del aceite en el momento del corte y se obtiene la elevación de temperatura del devanado sobre el aceite.

La elevación de temperatura media de los devanados sobre la temperatura ambiente, se obtiene sumando la elevación de temperaturas devanados-aceite en el instante de corte, más la elevación de temperatura aceite-ambiente durante la estabilización.

3.8.3.2 Método de oposición

Este método requiere de dos transformadores iguales en prueba, en donde las bajas tensiones se conectan en paralelo, suministrándoles su voltaje y frecuencia nominales, con lo cual se tienen las pérdidas magnéticas, y las altas tensiones se conectan en serie suministrándoles su corriente y frecuencia nominales, con lo cual se tienen las pérdidas eléctricas, como muestran las figuras 3.29 y 3.30.

El método de oposición requiere mayor cantidad de equipo que el método de corto-circuito, y a la vez consume más energía, lo que dificulta la prueba a medida que aumenta la capacidad de los transformadores.

Este método es recomendado para transformadores tipo seco. La prueba se desarrolla de acuerdo a los siguientes pasos:

1. Se suministran voltajes y frecuencias nominales par baja tensión, y corriente y frecuencia nominales par alta tensión, tomando lecturas periódicas de las temperaturas tanto ambiente coma de la región de embobinado.

Para transformadores auto-enfriados (clase AA) se considera temperatura ambiente la del aire alrededor del transformador, mientras que para transformadores enfriados par aire forzado (clase AFA) se considera la del aire de entrada a los ventiladores. La temperatura ambiente no debe ser menor de 10°C ni mayor de 40°C.

Los termómetros que se coloquen en las bobinas deben localizarse en ductos de aire, de tal manera que indiquen en la forma más aproximada la temperatura del devanado sin restringir la ventilación. Si hay partes sensibles del termómetro que no estén directamente en contacto con la bobina, deben protegerse con material aislante térmico.

2. Cuando se alcance la temperatura de estabilización, se efectúa el corte, se suspende la ventilación forzada si la hay, y se toman las medidas de resistencia.
3. Si se requiere la temperatura del otro devanado, se reanuda la prueba y en segundo corte se toman las medidas correspondientes.

Con estos resultados se calculan las resistencias al instante de los respectivos cortes, así como las temperaturas que alcanzan los devanados.

A las temperaturas de los devanados se les restan las temperaturas ambientes en el periodo de estabilización y se obtiene la elevación de temperatura de los devanados sobre el ambiente.

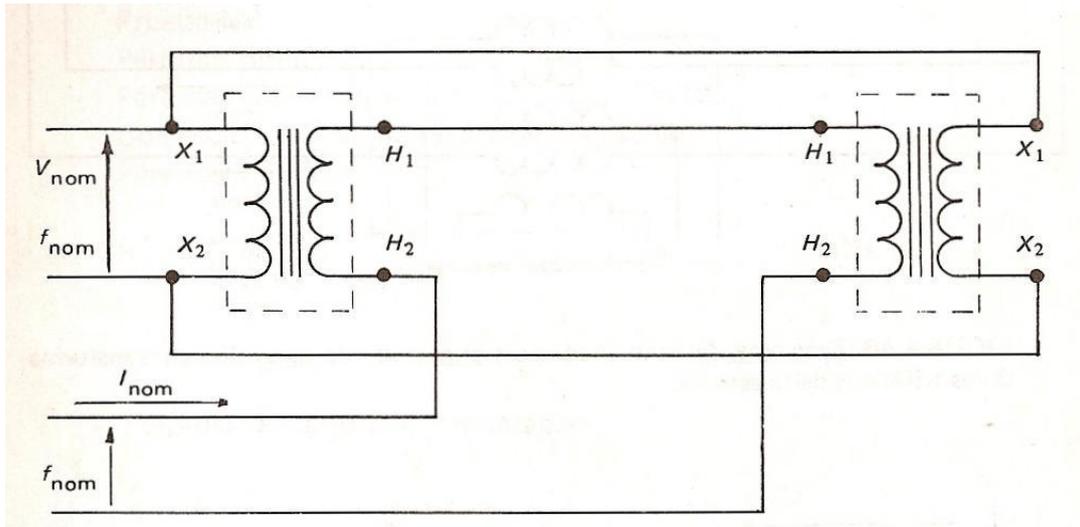


FIGURA 3.29 Diagrama de conexiones para el método de oposición en transformadores monofásicos.

3.8.3.3 Método de auto-oposición

Este método funciona para transformadores trifásicos y requiere de un arreglo en sus conexiones, de tal modo que tanto la alta como la Baja tensión estén en delta. Una de las deltas debe quedar abierta en uno de sus vértices.

Por la delta normal se suministra tensión trifásica, a voltaje y frecuencia nominales, con lo que se tienen las pérdidas magnéticas, y por la delta abierta se suministra una tensión monofásica tal, que haga circular la corriente nominal de fase, a la frecuencia nominal, con lo que se tienen las pérdidas eléctricas.

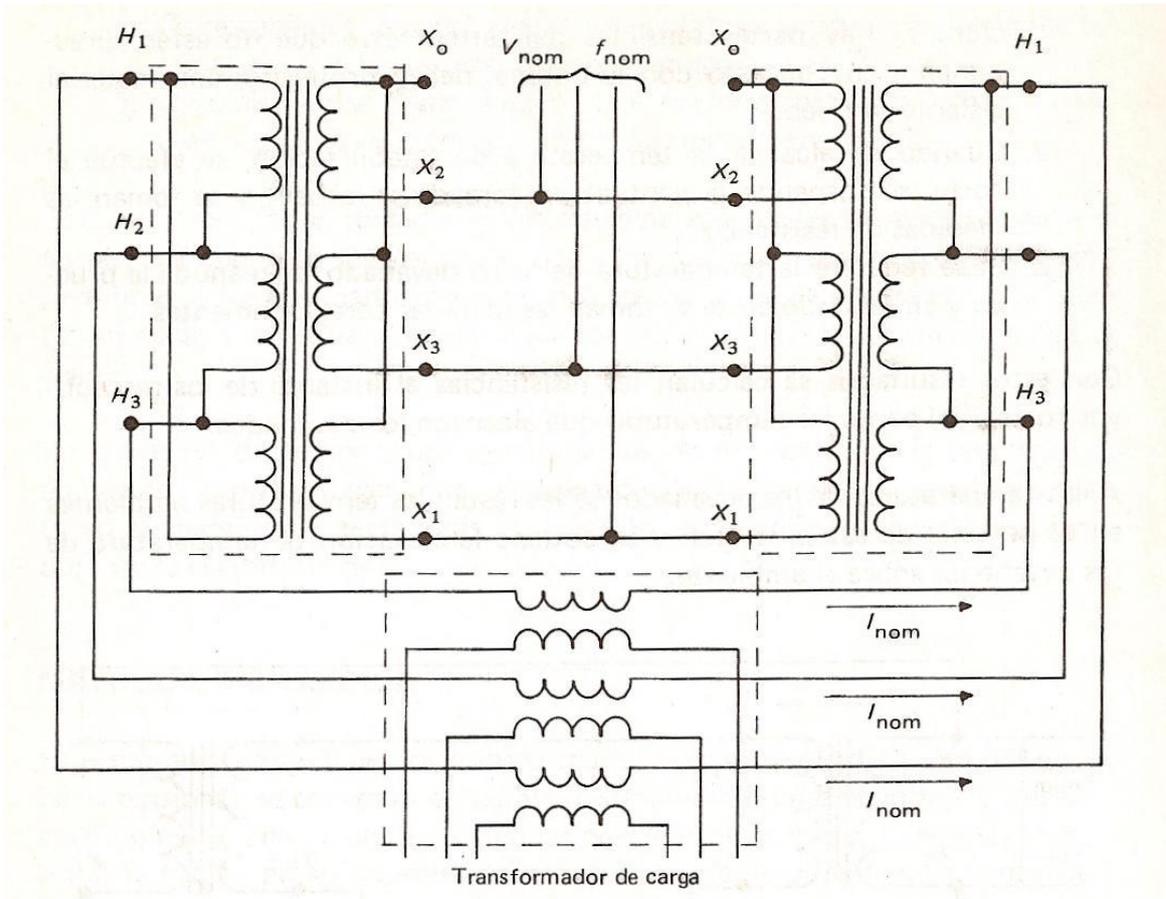


FIGURA 3.30 Diagrama de conexiones para el método de oposición en transformadores trifásicos delta-estrella.

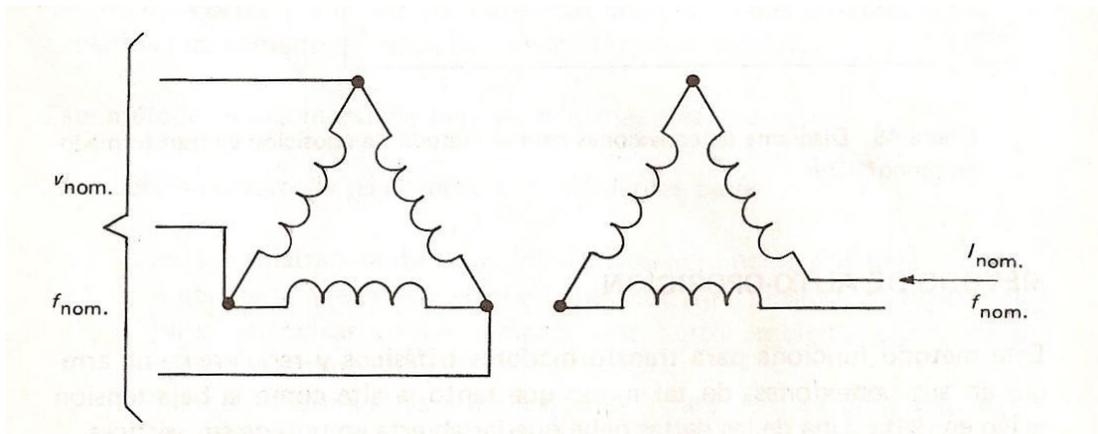


FIGURA 3.31 Diagrama de conexiones para el método de auto-oposición.

Este método se recomienda para transformadores trifásicos, tipo seco, cuando no existe el duplicado para el método de oposición.

PRUEBAS CON ALTA TENSION

Estas pruebas tienen por objeto verificar las condiciones de los dieléctricos, fundamentalmente el aceite y los aislamientos de los devanados.

Se emplean tensiones superiores a las nominales y se clasifican como pruebas destructivas, puesto que someten a los aislamientos a esfuerzos eléctricos superiores a los de diseño, pero de los que no estará exento el transformador en su futura operación como parte de un sistema eléctrico de potencia, por lo cual es necesario garantizar que podrá soportar estas condiciones.

3.9 Rigidez dieléctrica del aceite.

En el caso de transformadores sumergidos en aceite, éste tiene un doble fin, que es servir como medio refrigerante, y como dieléctrico entre todas las piezas sumergidas. Desde el punto de vista del comportamiento eléctrico del equipo, es importante una alta rigidez dieléctrica del aceite. Un aceite puro tiene una rigidez elevada, Pero esta se reduce a medida que aumenta su índice de contaminación.

El aceite nuevo que se usará en un transformador puede estar contaminado por:

- Impureza en los recipientes de transporte o de almacén.
- Absorción de humedad por contacto prolongado con el aire ambiente.

La medición de la rigidez del aceite puede ser también una prueba de mantenimiento preventivo, y para aceite que ha estado trabajando en transformador, podemos considerar una tercera causa de contaminación.

- Degradación del aceite por descargas parciales.

Un aceite que muestre baja rigidez no es apropiado para su uso en el transformador, por lo que será necesario someterlo a un proceso de filtrado para eliminar humedad e impurezas.

La prueba consiste en colocar dos electrodos planos o semiesféricos dentro de una muestra de aceite, y aplicarles una diferencia de potencial cuyo valor aumenta gradualmente hasta obtener la ruptura. Se requiere el siguiente equipo:

- a) *Transformador de alta tensión.* Un transformador elevador, alimentado en baja tensión por una fuente de voltaje regulado, y capaz de dar en alta tensión un valor superior a 35 KV. Se recomienda una capacidad mínima de 0.5 KVA para evitar distorsión de onda.

- b) *Interruptor*. El transformador debe protegerse con un interruptor automático capaz de abrir como máximo en tres ciclos a partir de la ruptura.
- c) *Control de tensión*. De preferencia se debe tener un control automático para incrementar la tensión a razón de 3 KV/seg. \pm 20%. Si no es posible, esta operación puede ser manual.
- d) *Medidor de tensión*. Un voltmetro integrado al equipo, que nos indique con la mayor precisión los KV en el secundario del transformador elevador.
- e) *Copa de prueba*. Debe cumplir con los siguientes requisitos.

Debe tener los electrodos rígidamente montados, con sus caras paralelas y sus ejes coincidentes en línea horizontal. Los electrodos deben ser discos de bronce pulido, de 2.54 cm. de diámetro, cuando menos 0.32 cm. de espesor con aristas a 90°, y separados una distancia de 2.54 ± 0.01 mm.

Ninguna parte de la copa debe estar a menos de 1.3 cm de cualquier parte de los electrodos y su borde superior debe estar a 3.8 cm de la parte superior de los electrodos.

- f) *Muestreadores*. Son dispositivos adecuados para extraer la muestra de acuerdo al recipiente de almacenamiento.
- g) *Recipiente de muestreo*. Se deben usar botellas de vidrio transparente para una mejor inspección visual, con capacidad de dos litros y tapones que eviten cualquier clase de contaminación.

Preparación. Tanto el muestreador como el recipiente de muestreo deben lavarse cuidadosamente con solventes, agua y jabón. Se recomienda que en el momento de muestrear el aceite se encuentre a la temperatura ambiente, a fin de reducir al mínimo la absorción de humedad. No debe drenarse antes de tomar la muestra, pues es importante que esta conserve todas sus impurezas.

Al vaciar la muestra en el recipiente, debe hacerse escurriéndolo por las paredes, para que no se formen burbujas. Cuando falte aproximadamente 13 mm para que se llene, se retira el muestreador, se tapa la botella y se le coloca una identificación.

Previamente a la prueba, la muestra debe agitarse suavemente, de tal manera que no se produzcan burbujas. Se debe usar una porción de ella para enjuagar la copa, y después se limpia esta con papel o gamuza secos y libres de pelusas.

Es conveniente una primera prueba de la copa con aceite nuevo, filtrado y seco.

Procedimiento. Se llena la copa lentamente hasta un nivel de 2 cm., arriba del borde superior de los electrodos, evitando la inclusión de aire, y se coloca en el transformador de prueba.

La temperatura ambiente no debe ser menor de 20°C.

Después de 2 a 3 minutos de haber llenado la copa, se comienza a aplicar la tensión, incrementándola a razón de 3 KV/segundo hasta que ocurra la ruptura.

La ruptura se caracteriza por una descarga continua entre los electrodos, que hace operar el interruptor de seguridad. En ocasiones ocurren pequeñas descargas momentáneas que no deben tomarse en cuenta.

Una vez determinada la ruptura, se vacía la copa en un recipiente limpio, y se llena nuevamente con otra porción de muestra, determinando nuevamente su ruptura.

Si ningún valor de las dos primeras pruebas está por debajo del valor de aceptación, el aceite se considera bueno y no requiere más pruebas.

Si cualquiera de los valores resultara por debajo de aceptación, entonces se requieren otras tres pruebas de la muestra.

Entonces se obtiene la diferencia entre los valores mayor y menor de las cinco pruebas, y se multiplica por tres. Si el valor obtenido es mayor que el inmediato superior al valor mínimo, la estadística es insuficiente y habrá que efectuar otras cinco pruebas. El promedio de los diez resultados se reportará como la tensión de ruptura de la muestra. Si no es así, baste el promedio de las primeras cinco pruebas.

3.10 Potencial aplicado

Esta prueba sirve para verificar el aislamiento entre embobinados, entre un embobinado y tierra, así como el aislamiento de las boquillas o pasamuros. Consiste en aplicar una tensión elevada a uno de los embobinados, con el otro embobinado, el núcleo y el tanque conectados a tierra.

El valor de la tensión aplicada depende de la clase de aislamiento (en función de su voltaje nominal de operación) y lo fijan las normas de acuerdo a la tabla que se muestra en la figura 3.32.

<i>Clase de aislamiento KV</i>	<i>Potencial aplicado KV</i>	<i>Clase de aislamiento KV</i>	<i>Potencial aplicado KV</i>
0.6	4	92	185
1.2	10	115	230
2.5	15	138	275
5.0	19	161	335
8.7	26	196	395
15	34	215	430
18	40	230	460
25	50	315	630
34.5	70	345	690
46	95	375	750
69	140	400	800

FIGURA 3.32 Valores del potencial aplicado de acuerdo a la clase de aislamiento.

Para la prueba se requiere un transformador elevador, alimentado en baja tensión con una fuente de voltaje regulado, y capaz de suministrar en alta tensión el voltaje requerido para la prueba. Debe tener integrado un voltímetro que reporte con la debida precisión los KV en alta tensión.

No se debe colocar ninguna resistencia de valor apreciable entre el equipo de prueba y el transformador por probar. Se permite sin embargo, el uso de bobinas reactivas.

Es conveniente incluir explosores o voltímetros de esferas a una tensión 10% en exceso de la tensión de prueba.

Conexiones. Todas las terminales del devanado bajo prueba deben conectarse entre sí y a la línea del equipo de prueba, por medio de alambre desnudo, delgado pero de diámetro no menor de 0.3 mm.

Todas las demás terminales y partes conductoras, incluyendo núcleo y tanque, deben conectarse entre sí, a tierra y a la otra terminal del equipo de prueba formando un circuito solido metálico.

Procedimiento. La prueba debe iniciarse a un valor máximo del 25% de la tensión de prueba, y se incrementa hasta su valor total aproximadamente en 15 segundos.

La tensión de prueba se mantiene durante un minuto.

Después de un minuto, se reduce la tensión a un valor igual o menor que el de iniciación en un máximo de 5 segundos y se desenergiza el circuito.

3.11 Potencial inducido

Esta prueba tiene por objeto verificar el aislamiento entre espiras y entre capas, de todos los devanados del transformador. Se efectúa haciéndolos trabajar durante un tiempo determinado al 200% de su tensión nominal. Al suministrar a uno de los devanados, un voltaje de este valor, en los demás se inducirán tensiones en la misma proporción, siempre que el núcleo no se sature, y todos los embobinados estarán bajo las condiciones de prueba.

Sin embargo, se recomienda que en ninguno de los devanados aparezca un valor de potencial inducido superior a su correspondiente potencial aplicado.

El valor máximo de la onda de flujo en el núcleo del transformador está dado por:

$$\emptyset = \frac{V}{4.44Nf} \quad (3.19)$$

En donde

\emptyset = Flujo magnético.

V = Voltaje eficaz en el devanado en estudio.

N = Número de espiras del mismo devanado.

f = Frecuencia de la onda de voltaje.

De la formula anterior observamos que el flujo en el núcleo es directamente proporcional al voltaje suministrado, e inversamente proporcional a la frecuencia, de manera que si se va a suministrar un voltaje mayor al de diseño, es necesario aumentar también la frecuencia para evitar la saturación del núcleo.

Las normas marcan como frecuencia mínima de prueba:

$$F = \frac{\textit{Tensiòn inducida a través del devanado}}{1.1 \textit{Tensión nominal del devanado}} \times \textit{Frecuencia nominal} \quad (3.20)$$

Pudiendo utilizarse frecuencias mayores.

Mientras mayor sea la frecuencia, la prueba es más severa, de manera que se recomienda que su duración sea aproximadamente de 7200 ciclos.

Para frecuencias múltiples de 60 Hz, la duración de la prueba está especificada en la tabla siguiente.

<i>Frecuencia Hz</i>	<i>Duración segundos</i>
120 o menos	60
180	40
240	30
300	24
360	20

FIGURA 3.33 Duración de la prueba de potencial inducido.

Para cualquier frecuencia intermedia, el tiempo se obtiene según la ecuación 3.20.

Para esta prueba se requiere una fuente de voltaje regulado, a una frecuencia comprendida entre las de la tabla anterior. Si la fuente no incluye un voltímetro y un amperímetro, estos deben intercalarse en el circuito de alimentación del transformador en prueba.

Conexiones. Se debe elegir uno de los embobinados del transformador que sea posible alimentar al 200% de su voltaje nominal el cual se conecta a la fuente, incluyendo un voltímetro y un amperímetro. El otro embobinado debe permanecer en circuito abierto.

Procedimiento. La prueba se debe iniciar con un valor igual o menor que el 25% de la tensión completa y se aumenta gradualmente hasta alcanzar el valor de prueba en aproximadamente 15 segundos. Se mantiene la tensión plena durante el tiempo de prueba, mientras se observa si no aparece ninguna anomalía, como:

- Ruidos extraños.
- Burbujas de humo.
- Inestabilidad en la corriente de excitación.

Al concluir el tiempo de prueba, se reduce el voltaje a un valor igual o menor que el de iniciación, en aproximadamente 5 segundos y se abre el circuito.

CAPITULO IV DESARROLLO Y EJECUCIÓN DE LAS PRUEBAS EN BAJA TENSIÓN

Las siguientes pruebas se realizaron en los siguientes equipos:

Transformador monofásico:

Módulo de transformador EMS 8341

60VA-120/208V-0.5/0.3A – 60Hz

Transformador trifásico:

10 KVA - 254/220-127V- 22.7A – 60Hz

4.1 MEDICIÓN DE LA RESISTENCIA ÓHMICA

METODO DEL PUENTE DE KELVIN

Transformador monofásico

Procedimiento

- Identificamos las terminales de alta y de baja tensión del transformador en prueba.
- Conectamos el puente de Kelvin a las terminales del devanado de alta tensión como se indica en la figura 4.1

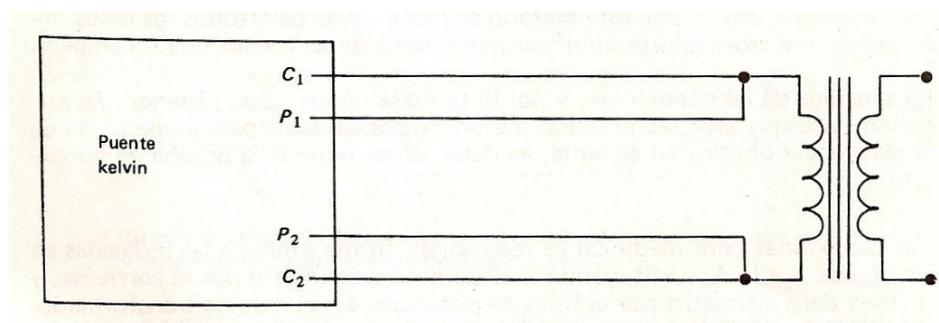


FIGURA 4.1a. Conexiones del puente de Kelvin para la medición de la resistencia óhmica.

Para el caso del transformador monofásico bajo prueba identificamos los puntos 1 y 2 como las terminales del devanado de alta tensión como podemos observar en la figura 4.1b.

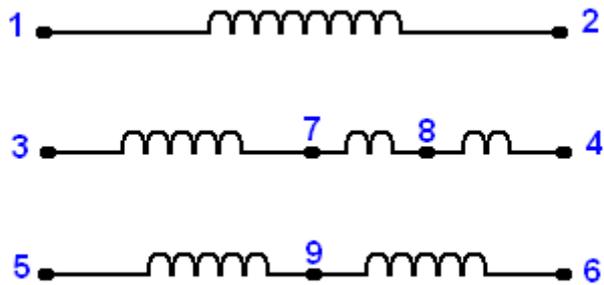


Figura 4.1b Esquema físico de los devanados del transformador monofásico bajo prueba.

Importante: Al desenergizar la bobina, el transformador almacena energía en el núcleo, si esta energía se descarga en el galvanómetro puede causarle daño, razón por la cual realizamos la siguiente secuencia de pasos:

- 1.- Cerrar el interruptor de corriente y esperar el tiempo necesario de estabilización.
 - 2.- Cerrar el interruptor del galvanómetro y ajustar la lectura.
 - 3.- Abrir el interruptor del galvanómetro.
 - 4.- Abrir el interruptor de corriente.
- Tomamos lecturas y anotamos en la tabla 4.1.
 - Cambiamos las conexiones a las terminales de baja tensión.
 - Tomamos lecturas para el devanado de baja tensión y anotamos en la tabla 4.1
 - Anotamos la temperatura ambiente.

Prueba: Medición de la resistencia óhmica			
Método de prueba: Puente de Kelvin			
Alta tensión (primario)		Baja tensión (secundario)	
Terminales	Resistencia Ω	Terminales	Resistencia Ω
1-2	8.66	3-7	14.36
		3-8	25.3
		9-6	4.7
		3-4	29.45
		7-8	11.12
		7-4	15.18
		5-6	8.66
		8-4	4.12
		5-9	4.07
Temperatura ambiente:		28° C	

TABLA 4.1 Valores obtenidos para la prueba de resistencia óhmica en transformador monofásico.

Transformador Trifásico

Procedimiento

- Identificamos las terminales de alta y de baja tensión del transformador en prueba.
- Conectamos el puente de Kelvin a dos de las terminales de alta tensión de acuerdo a la figura 4.2a o 4.2b

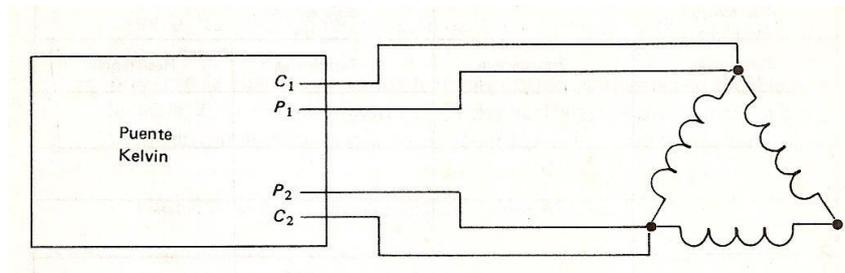


Figura 4.2a Conexiones del puente de Kelvin para la medida de la resistencia óhmica en un transformador trifásico con conexión delta en el devanado de alta tensión.

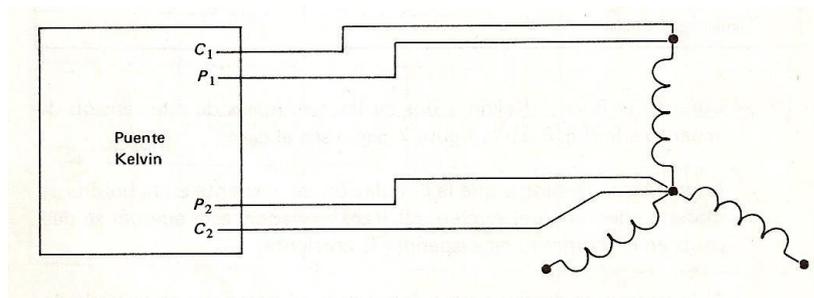


Figura 4.2b Conexiones del puente de Kelvin para la medida de la resistencia óhmica en un transformador trifásico con conexión estrella en el devanado de alta tensión.

Para el caso del transformador trifásico bajo prueba realizamos la siguiente conexión; los devanados de alta tensión conectados en delta y los de baja tensión conectados en estrella como podemos observar en la figura 4.2c.

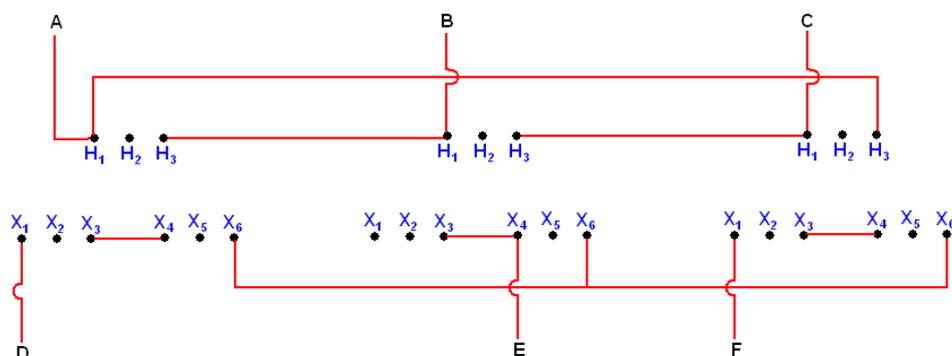


Figura 4.2c Diagrama físico de conexión de los devanados del transformador trifásico bajo prueba.

Importante. Por razones de seguridad antes mencionadas seguimos la misma secuencia de pasos que en la prueba del transformador monofásico para la medición.

- 1.- Cerrar el interruptor de corriente y esperar el tiempo necesario de estabilización.
 - 2.- Cerrar el interruptor del galvanómetro y ajustar la lectura.
 - 3.- Abrir el interruptor del galvanómetro.
 - 4.- Abrir el interruptor de corriente.
- Tomamos lecturas y anotamos los valores en la tabla 4.2.
 - Realizamos la conexión para los demás pares de terminales de alta tensión y anotamos lecturas.
 - Cambiamos las conexiones a dos de las terminales de baja tensión de acuerdo a la figura 4.2.
 - Tomamos las lecturas correspondientes a baja tensión y anotamos en la tabla 4.2.
 - Realizamos la conexión para los demás pares de terminales de baja tensión y anotamos valores.
 - Registramos la temperatura ambiente.

Prueba: Medición de la resistencia óhmica			
Método de prueba: Puente de Kelvin			
Alta tensión conexión "Δ"		Baja tensión conexión "Y"	
Terminales	Resistencia Ω	Terminales	Resistencia Ω
A-B	0.214	D-E	0.233
B-C	0.189	E-F	0.214
C-A	0.197	F-D	0.203
Temperatura ambiente:		28° C	

TABLA 4.2 Valores obtenidos para la prueba de resistencia óhmica en transformador trifásico.

4.2 MEDICIÓN DE LA RESISTENCIA DE AISLAMIENTO

Transformador monofásico

- Identificamos las terminales de alta tensión del transformador y por medio de un puente las ponemos en corto circuito al igual que las terminales de baja tensión
- Identificamos un punto que sea accesible para una buena conexión a tierra. Puede ser el núcleo del transformador o en el tanque.
- Conectamos el Megger a las terminales de alta y de baja tensión según la figura 4.3a.
- Excitamos el Megger, tomamos lectura y anotamos en la tabla 4.3.

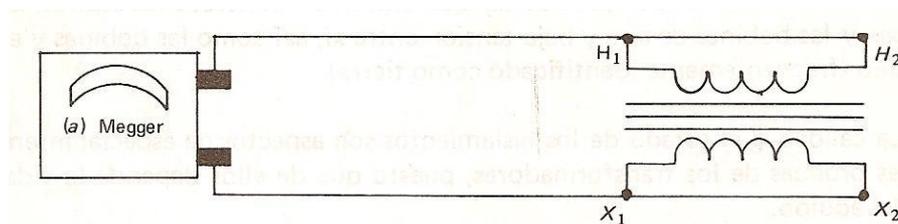


Figura 4.3a. Diagrama de conexión "alta tensión y baja tensión" para la prueba de resistencia de aislamiento en transformador monofásico.

- Conectamos el Megger a las terminales de alta y tierra según la figura 4.3b.
- Excitamos el Megger, tomamos lectura y anotamos en la tabla 4.3.

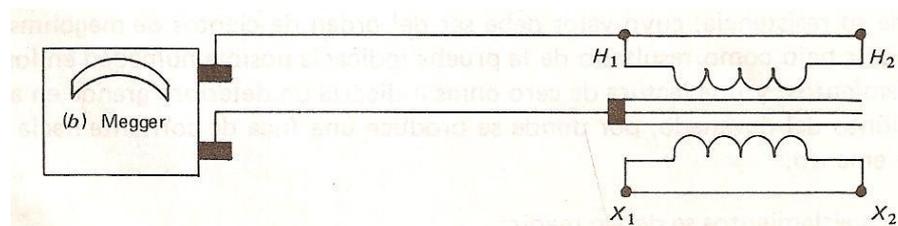


Figura 4.3b. Diagrama de conexión "alta tensión y tierra" para la prueba de resistencia de aislamiento en transformador monofásico.

- Conectamos el Megger a las terminales de baja tensión y tierra según la figura 4.3c.
- Excitamos el Megger, tomamos lectura y anotamos en la tabla 4.3.

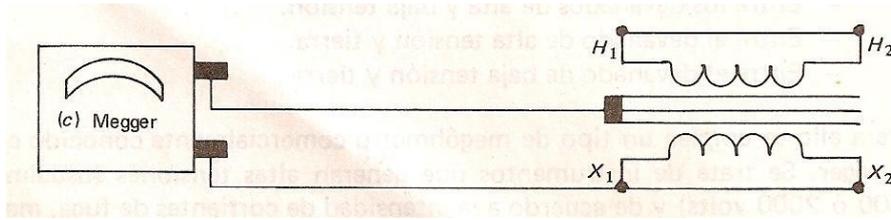


Figura 4.3c. Diagrama de conexión “baja tensión y tierra” para la prueba de resistencia de aislamiento en transformador monofásico.

- Conectamos el Megger a las terminales de alta tensión y baja tensión + tierra según la figura 4.3d.
- Excitamos el Megger, tomamos lectura y anotamos en la tabla 4.3.

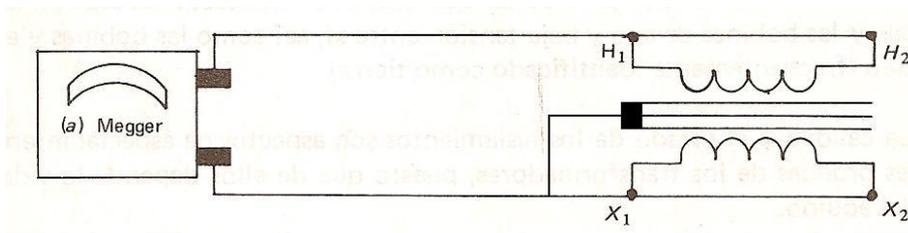


Figura 4.3d. Diagrama de conexión “alta tensión y baja tensión + tierra” para la prueba de resistencia de aislamiento en transformador monofásico.

- Conectamos el Megger a las terminales de baja tensión y alta tensión + tierra según la figura 4.3e.
- Excitamos el Megger, tomamos lectura y anotamos en la tabla 4.3.

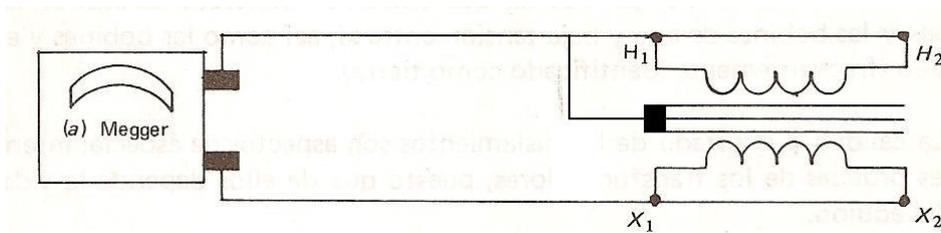


Figura 4.3e. Diagrama de conexión “baja tensión y alta tensión + tierra” para la prueba de resistencia de aislamiento en transformador monofásico.

Prueba: Medición de la resistencia de aislamiento	
Referencia	Valor medido
Alta y baja tensión	2800 MΩ
Alta tensión y tierra	2400 MΩ
Baja tensión y tierra	2300 MΩ
Alta tensión y baja tensión + tierra	2400 MΩ
Baja tensión y alta tensión + tierra	2400 MΩ

TABLA 4.3 Valores obtenidos para la prueba de resistencia de aislamiento en transformador monofásico.

Transformador trifásico

El desarrollo de esta prueba es idéntico a la del transformador monofásico con solo que en esta prueba se incluyen los tres devanados en las conexiones tanto de alta como de baja tensión.

- Identificamos las terminales de alta tensión del transformador y por medio de un puente las ponemos en corto circuito al igual que las terminales de baja tensión
- Identificamos un punto que sea accesible para una buena conexión a tierra.
- Conectamos el Megger a las terminales de alta y de baja tensión según la figura 4.4a.
- Excitamos el Megger, tomamos lectura y anotamos en la tabla 4.4.

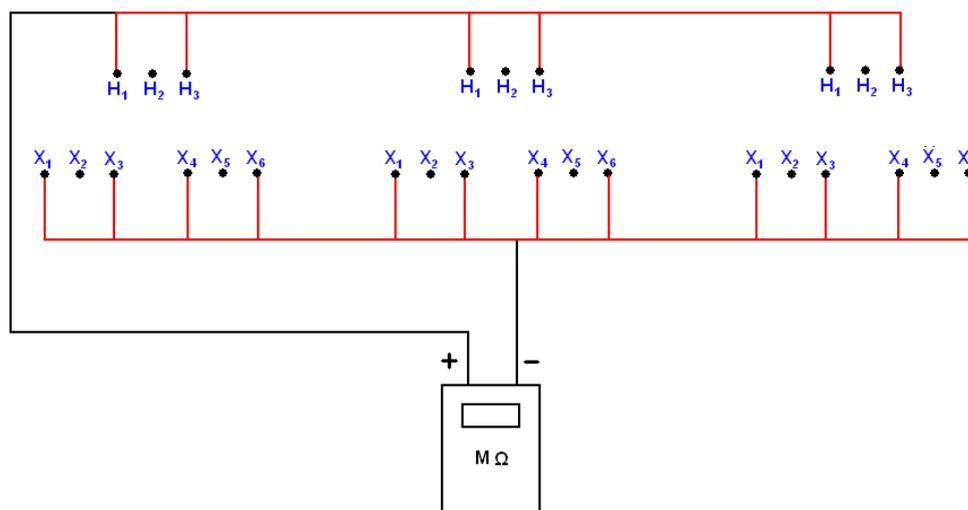


Figura 4.4a. Diagrama de conexión “alta tensión y baja tensión” para la prueba de resistencia de aislamiento en transformador trifásico.

- Conectamos el Megger a las terminales de alta tensión y tierra según la figura 4.4b.
- Excitamos el Megger, tomamos lectura y anotamos en la tabla 4.4.

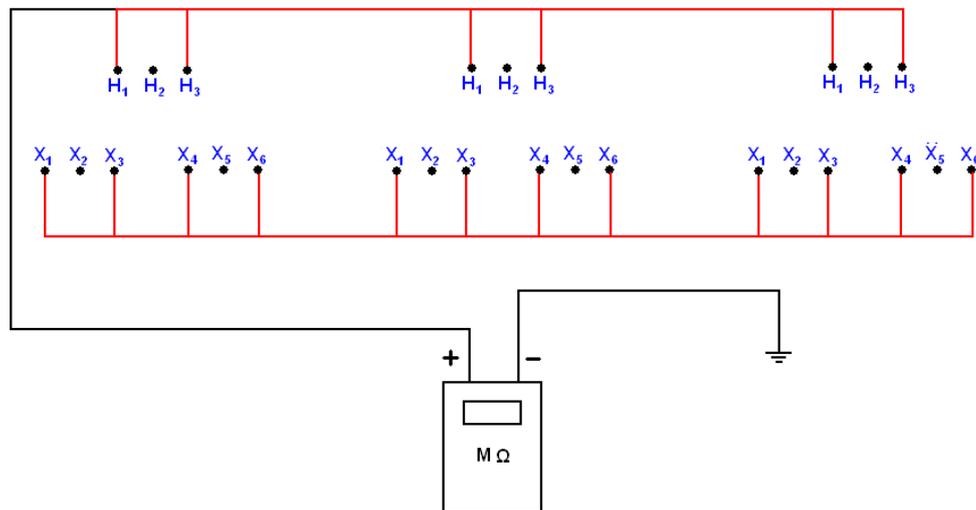


Figura 4.4b. Diagrama de conexión “alta tensión y tierra” para la prueba de resistencia de aislamiento en transformador trifásico.

- Conectamos el Megger a las terminales de baja tensión y tierra según la figura 4.4c.
- Excitamos el Megger, tomamos lectura y anotamos en la tabla 4.4.

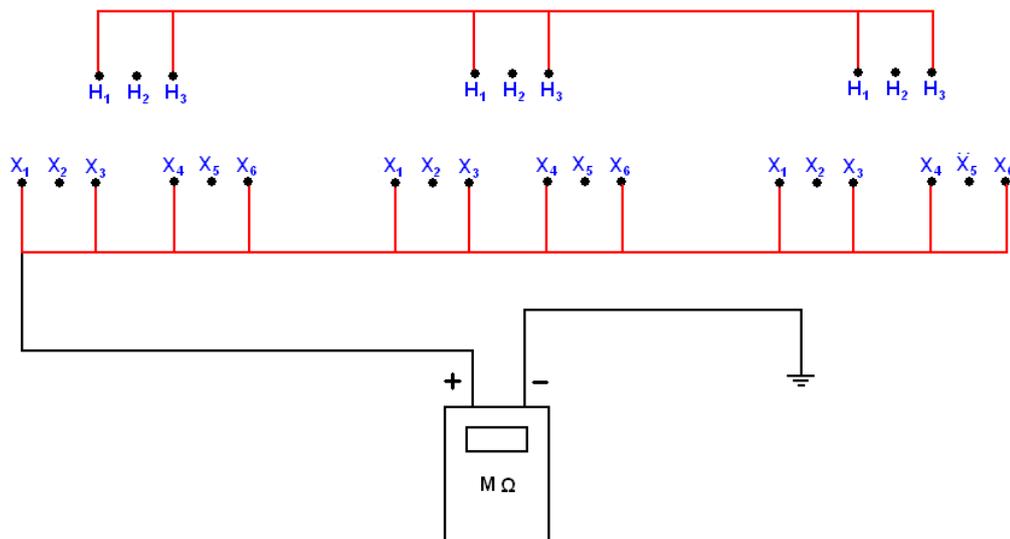


Figura 4.4c. Diagrama de conexión “baja tensión y tierra” para la prueba de resistencia de aislamiento en transformador trifásico.

- Conectamos el Megger a las terminales de alta tensión y de baja tensión+ tierra según la figura 4.4d.
- Excitamos el Megger, tomamos lectura y anotamos en la tabla 4.4.

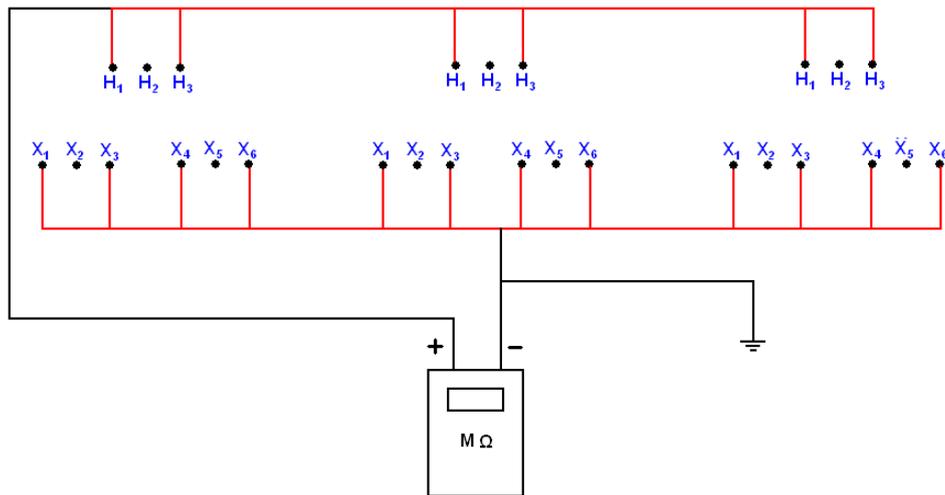


Figura 4.4d. Diagrama de conexión “alta tensión y baja tensión + tierra” para la prueba de resistencia de aislamiento en transformador trifásico.

- Conectamos el Megger a las terminales de alta y de baja tensión según la figura 4.4e.
- Excitamos el Megger, tomamos lectura y anotamos en la tabla 4.4.

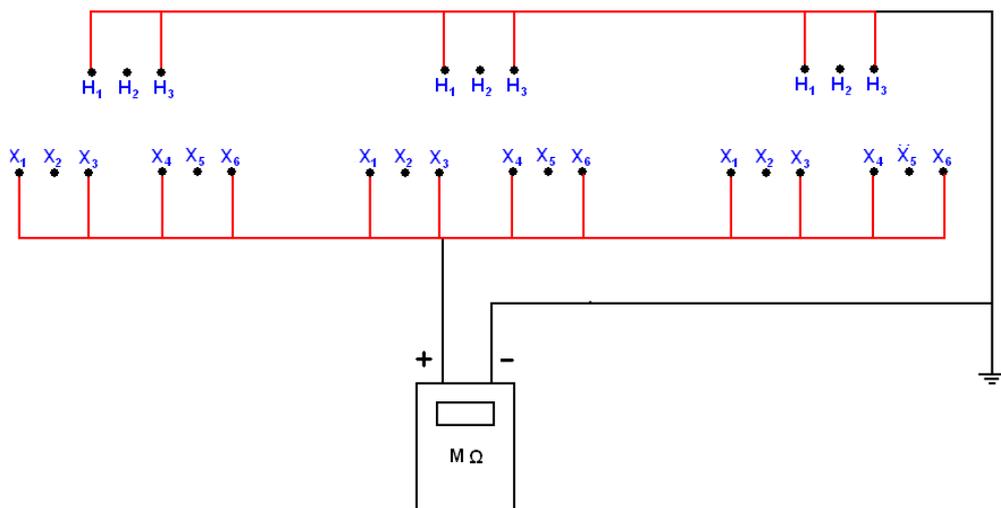


Figura 4.4e. Diagrama de conexión “baja tensión y alta tensión + tierra” para la prueba de resistencia de aislamiento en transformador trifásico.

Prueba: Medición de la resistencia de aislamiento	
Referencia	Valor medido
Alta y baja tensión	2600 MΩ
Alta tensión y tierra	2000 MΩ
Baja tensión y tierra	2000 MΩ
Alta tensión y baja tensión + tierra	2500 MΩ
Baja tensión y alta tensión + tierra	2200 MΩ

TABLA 4.4 Valores obtenidos para la prueba de resistencia de aislamiento en transformador trifásico.

4.3 RELACIÓN DE TRANSFORMACIÓN

Transformador monofásico.

- Identificamos las terminales de alta tensión y baja tensión del transformador en prueba.
- Verificamos los rangos de voltaje en alta y en baja tensión, de acuerdo a estos rangos seleccionamos la escala de los voltímetros a usar, y si es necesario, el transformador de potencial.
- Conectamos el circuito de prueba de acuerdo a la figura 4.5a o 4.5b

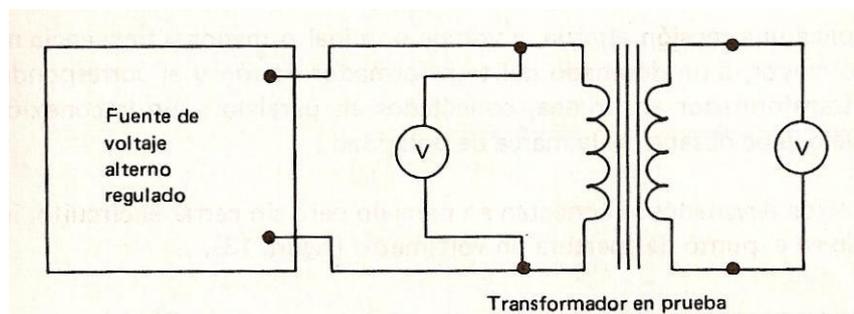


Figura 4.5a Diagrama de conexión para la prueba de relación de transformación por el método de los dos voltímetros.

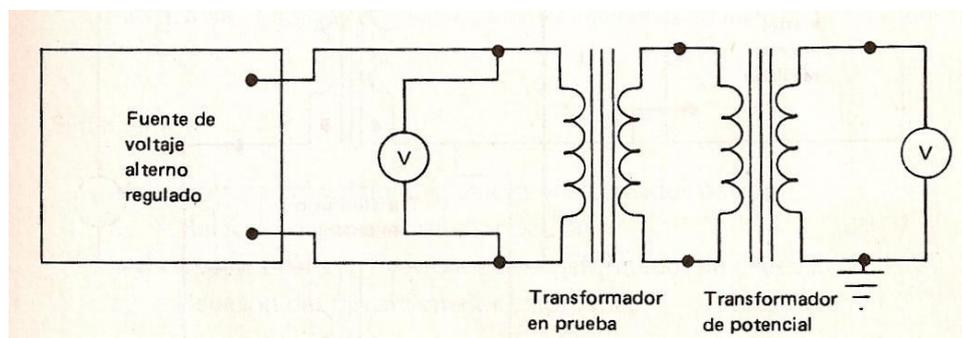


Figura 4.5b Diagrama de conexión para la prueba de relación de transformación por el método de los dos voltímetros con transformador de potencial.

Importante: Cuando se usa el transformador de potencial se manejan altas tensiones por lo cual colocamos los instrumentos de medición fuera de las áreas de peligro, por ningún motivo nos acercamos a estas aéreas mientras esté energizado el circuito.

Para el caso del transformador monofásico bajo prueba identificamos los puntos 1 y 2 como las terminales del devanado primario como podemos observar en la figura 4.1b

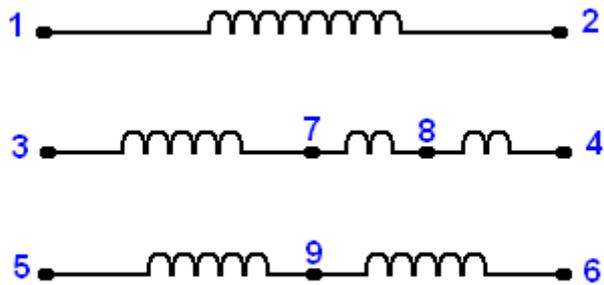


Figura 4.1b Esquema físico de los devanados del transformador monofásico bajo prueba.

- Conectamos la fuente de alimentación a las terminales 1 y 2 del módulo del transformador, aplicando un voltaje de 120 V c.a y mida el voltaje que hay en las terminales que se indican en la tabla 4.5.
- Tomamos lecturas y anotamos valores en la tabla 4.5.

Finalmente con estos resultados, para cada renglón de la tabla 4.5 obtenemos la relación de transformación.

Prueba: Relación de transformación				
Método de prueba: Dos voltímetros				
Primario		Secundario		Relación de transformación (r)
Terminales	(V)	Terminales	(V)	
1-2	120	3-4	210	0.57
1-2	120	3-7	105	1.14
1-2	120	5-6	120	1
1-2	120	5-9	60	2
1-2	120	7-8	75	1.6
1-2	120	8-4	25	4.8
1-2	120	9-6	60	2

TABLA 4.5 Valores obtenidos para la prueba de relación de transformación en transformador monofásico.

Transformador trifásico.

- Identificamos las terminales de alta tensión y baja tensión del transformador en prueba.
- Verificamos los rangos de voltaje en alta y en baja tensión, de acuerdo a estos rangos seleccionamos la escala de los voltímetros a usar, y si es necesario, el transformador de potencial.
- Conectamos el circuito de prueba de acuerdo a la figura 4.6.

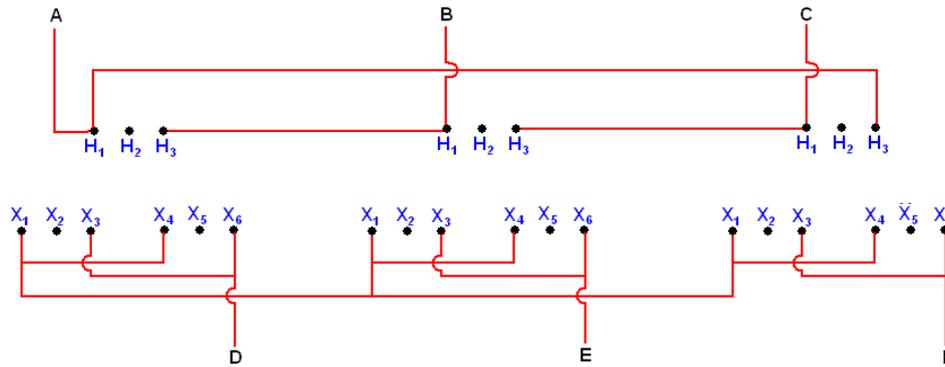


Figura 4.6 Diagrama de conexión para la prueba de relación de transformación en transformador trifásico por el método de los dos voltímetros.

- Una vez regulado el voltaje a $V_{\text{linea}} = 254 \text{ V}$ alimentamos el transformador trifásico en el lado de alta tensión en las terminales A y B, realizamos todas las posibles combinaciones en las conexiones del lado de alta tensión, asignando con las literales A, B, y C las terminales de la conexión delta en el lado de alta tensión y con D, E, y F las terminales de la conexión en estrella en el lado secundario, tomamos lecturas y anotamos en la tabla 4.6.

ALTA TENSIÓN (primario)		BAJA TENSIÓN (secundario)	
TERMINALES	TENSIÓN (V)	TERMINALES	TENSIÓN (V)
A-B	252.5	D-E	219.2
B-C	251.7	E-F	218.3
C-A	251.7	F-E	218.5
$r_{\text{prom}} = 252/219 = 1.15$			

TABLA 4.6 Valores obtenidos para la prueba de relación de transformación en transformador trifásico.

4.4 POLARIDAD EN EL TRANSFORMADOR

Transformador monofásico.

- Seleccionamos los instrumentos necesarios para la prueba según la figura 4.7. El voltímetro de CD deberá ser de pequeña escala y de preferencia con el cero central.
- Conectamos el circuito de pruebas de acuerdo al diagrama de la figura 4.7
- Energizamos la fuente, medimos un voltaje de CD de 5 v entre las terminales de la fuente de alimentación.
- Conectamos un voltímetro de CD entre las terminales 3 y 4 del transformador en prueba.
- Cerramos y abrimos instantáneamente el interruptor observando el comportamiento de la aguja del voltímetro.

Si la aguja se desplaza en el sentido de las manecillas del reloj tienen las terminales 1 y 3 la misma polaridad.

Si la aguja se desplaza en sentido a la escala, 1 y 3 no tienen la misma polaridad.

- Esperamos el tiempo necesario de estabilización.
- Repetimos el procedimiento para las terminales indicadas en la tabla 4.7.

Prueba: Polaridad en el transformador	
Método de prueba: Descarga inductiva	
Terminales	Polaridad
1 y 3	Misma polaridad
3 y 7	Misma polaridad
7 y 8	Misma polaridad
8 y 4	Misma polaridad
5 y 9	Misma polaridad
5 y 6	Misma polaridad
9 y 6	Misma polaridad

TABLA 4.7 Polaridad de las terminales de los devanados en del transformador monofásico bajo prueba por el método de descarga inductiva.

- Seleccionando los instrumentos necesarios, ahora conectamos el circuito de la figura 4.8.

Importante: considerar que ya fueron identificadas las marcas de polaridad en el transformador bajo prueba.

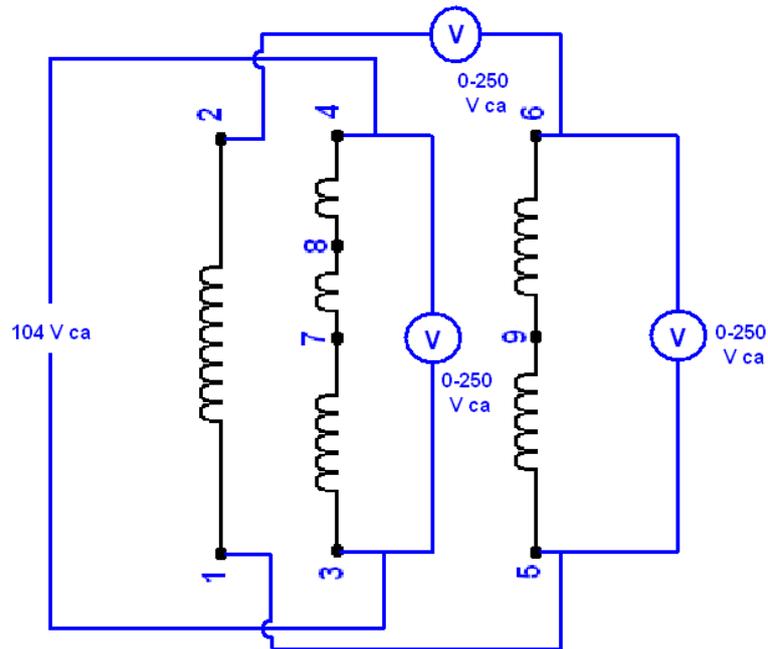


Figura 4.7 Diagrama físico de la conexión de las terminales de los devanados bajo la prueba de polaridad.

- Energizamos el circuito y anotamos lecturas en la tabla 4.7
- Desenergizamos el circuito y desconectamos los cables de las terminales.
- Conectamos el circuito de la figura 4.8

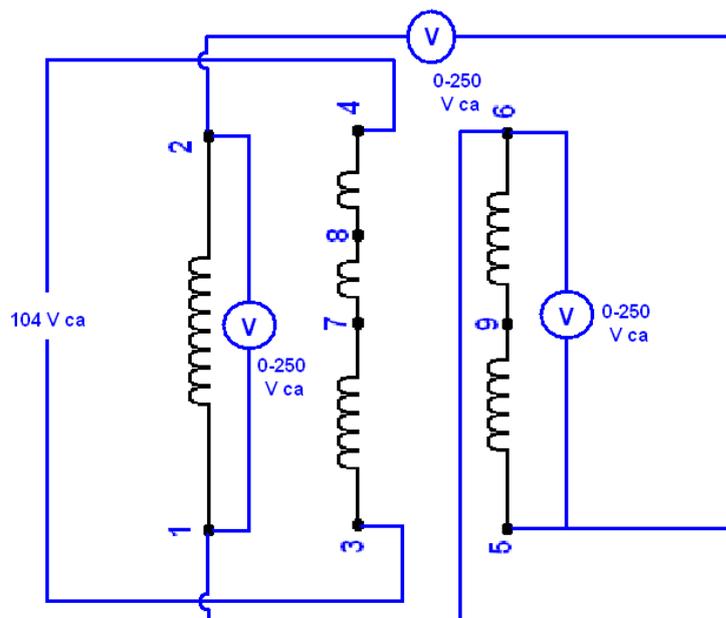


Figura 4.8 Diagrama físico de la conexión de las terminales de los devanados bajo la prueba de polaridad

- Energizamos el circuito y anotamos lecturas en la tabla 4.8
- Desenergizamos el circuito y desconectamos los cables de las terminales.

Es importante tomar en cuenta lo siguiente:

Propiedad aditiva en los devanados: En ella los voltajes que existen en los devanados se suman de manera algebraica, esto es conforme a la conexión que hay entre estos debido a su marca de polaridad.

Propiedad sustractiva en los devanados: En ella los voltajes que existen en los devanados se restan, esto es conforme a la conexión que hay entre estos debido a su marca de polaridad.

Prueba: Polaridad en el transformador			
Método de prueba: Dos voltímetros.			
V_{1-2}	V_{5-6}	V_{2-6}	<i>Polaridad</i>
60 V	60 V	0 V	<i>Sustractiva</i>
V_{1-2}	V_{5-6}	V_{2-5}	<i>Polaridad</i>
64 V	60 V	125 V	<i>Aditiva</i>

TABLA 4.8 Polaridad de las terminales de los devanados en del transformador monofásico bajo prueba por el método de los dos voltímetros.

4.5 ENSAYO DE CIRCUITO ABIERTO (pérdidas magnéticas y corriente de excitación).

Transformador monofásico.

- Seleccionamos los instrumentos de medición de acuerdo a los rangos de valores por medir. Para estimar la corriente de excitación (para el amperímetro y la bobina de corriente del wattmetro), puede fluctuar entre el 5 y 10% de la corriente nominal. Si es necesario incluya transformadores de corriente y/o de potencial.
- Conectamos el circuito de prueba de acuerdo al diagrama de la figura 4.9.

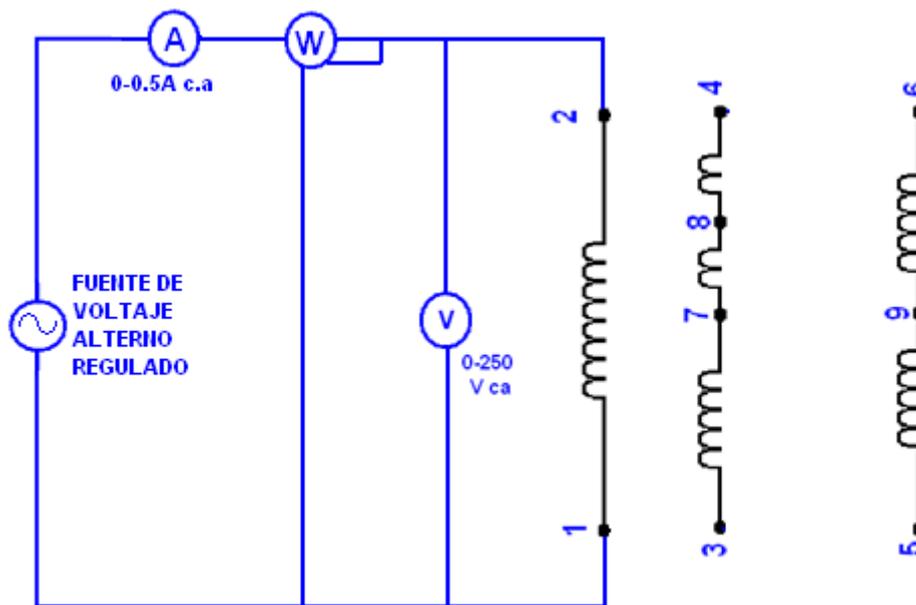


Figura 4.9 Diagrama físico de la conexión del transformador monofásico para la prueba de circuito abierto.

Importante: En las terminales del secundario aparecerán voltajes peligrosos, por lo cual tomamos las precauciones necesarias.

- Energizamos la fuente y ajustamos el voltaje al valor nominal.
- Tomamos lecturas y anotamos valores de tensión, corriente y potencia en la tabla 4.9

Prueba: ensayo de circuito abierto		
Tensión (V)	Corriente de excitación (mA)	Pérdidas magnéticas (W)
120	108	5

TABLA 4.9 Parámetros obtenidos en la prueba de circuito abierto en el transformador monofásico.

Transformador trifásico.

- Seleccionamos los instrumentos de medición de acuerdo a los rangos de valores por medir. Para estimar la capacidad del amperímetro y la bobina de corriente del wattmetro calculamos el 10% de la corriente nominal. Si es necesario incluya transformadores de corriente y/o de potencial.
- Conectamos el circuito de prueba de acuerdo al diagrama de la figura 4.10.

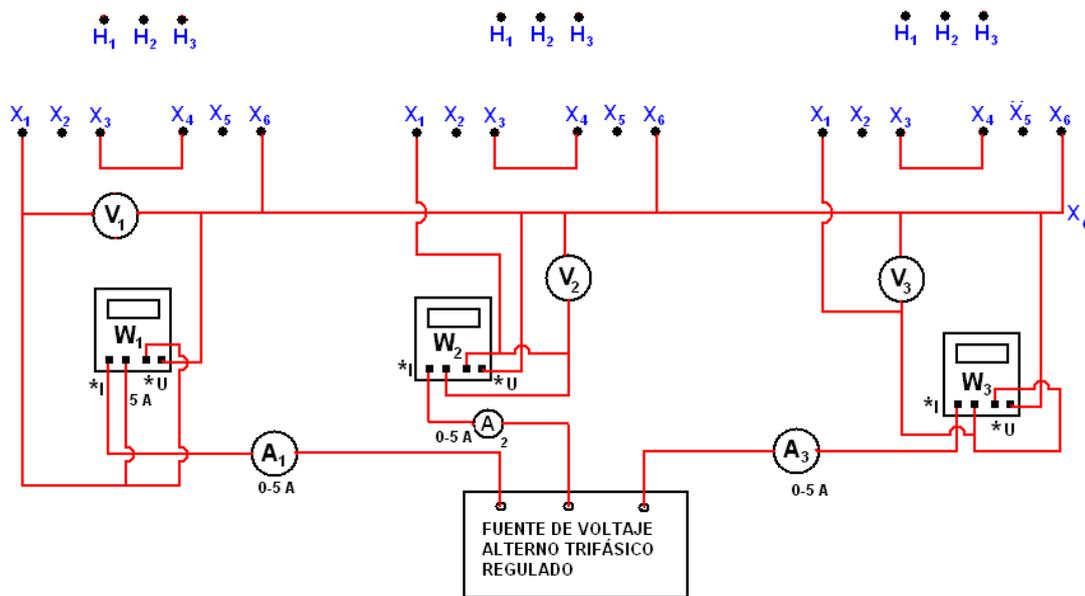


Figura 4.10 Diagrama de conexión para la prueba o ensayo de circuito abierto para transformador trifásico.

Precaución: En esta prueba generalmente se prefiere alimentar por el lado de baja tensión como lo muestra el diagrama anterior. Por lo cual, en las terminales de alta tensión se inducen voltajes peligrosos.

- Energizamos la fuente y ajustamos la tensión al valor nominal.
- Tomamos lecturas de los tres amperímetros, voltímetros, wattmetros y anotamos valores de tensión, corriente y potencia en la tabla 4.10.

Prueba: ensayo de circuito abierto								
Tensión (V)			Corriente de excitación (mA)			Pérdidas magnéticas (W)		
V ₁	V ₂	V ₃	A ₁	A ₂	A ₃	W ₁	W ₂	W ₃
243	241	244	0.9	0.8	0.9	5	5	5

TABLA 4.10 Parámetros obtenidos en la prueba de circuito abierto en el transformador trifásico.

Las pérdidas magnéticas serán la suma aritmética de las lecturas de los wattmetros. La corriente de excitación será el promedio de las lecturas de los ampermetros.

4.6 ENSAYO DE CORTO CIRCUITO (pérdidas eléctricas).

Transformador monofásico.

- Seleccionamos los instrumentos de medición de acuerdo a los rangos de valores por medir.
- Conectamos el circuito de prueba de acuerdo al diagrama de la figura 4.11

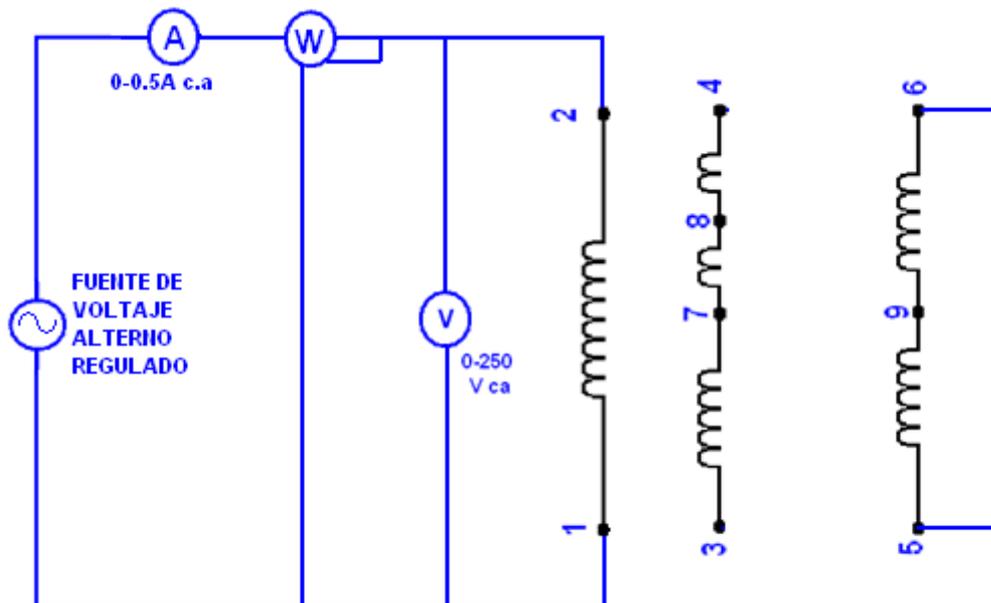


Figura 4.11 Diagrama físico de la conexión del transformador monofásico para la prueba de corto circuito.

Precaución: Al energizar el transformador vamos a hacer circular la corriente nominal, lo que ocasiona elevación de temperatura, y a medida que esto ocurre cambian las medidas de los instrumentos, por lo cual una vez obtenida la corriente nominal, rápidamente tomamos las lecturas.

- Energizamos la fuente y aumentamos gradualmente el voltaje hasta obtener la corriente nominal. Tomamos lecturas y anotamos en la tabla 4.11.

Prueba: ensayo de corto circuito		
Tensión (V)	Corriente (A)	Pérdidas eléctricas (W)
5	0.5	1.5

TABLA 4.11 Parámetros obtenidos en la prueba de corto circuito en el transformador monofásico.

Las pérdidas eléctricas o pérdidas de carga están dadas por la lectura del wattmetro.

Transformador trifásico.

Seleccionamos los instrumentos de medición de acuerdo a los rangos de valores por medir.

- Conectamos el circuito de prueba de acuerdo al diagrama de la figura 4.12

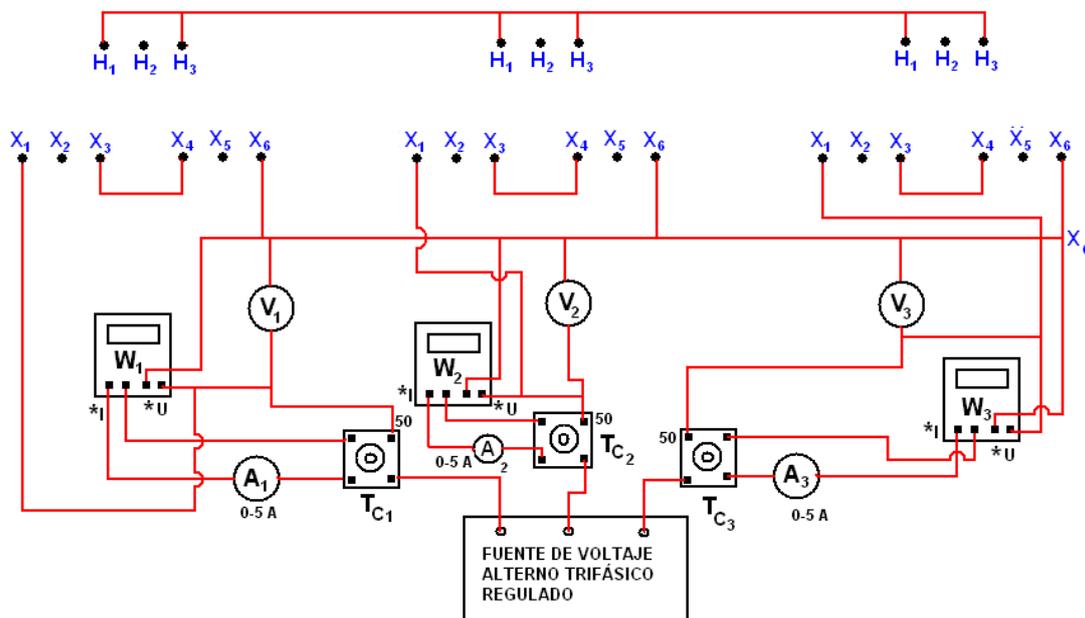


Figura 4.12 Diagrama de conexión para la prueba o ensayo de circuito abierto para transformador trifásico.

Precaución: Al energizar el transformador vamos a hacer circular la corriente nominal, lo que ocasiona elevación de temperatura, y a medida que esto ocurre cambian las medidas de los instrumentos, por lo cual una vez obtenida la corriente nominal, rápidamente tomamos las lecturas.

- Energizamos la fuente y aumentamos gradualmente el voltaje hasta obtener la corriente nominal. Tomamos lecturas y anotamos en la tabla 4.12.

Prueba: ensayo de corto circuito								
Tensión (V)			Corriente (A)			Pérdidas eléctricas (W)		
V ₁	V ₂	V ₃	A ₁	A ₂	A ₃	W ₁	W ₂	W ₃
5.28	5.46	5.22	45	45	50	10	10	10

TABLA 4.12 Parámetros obtenidos en la prueba de corto circuito en el transformador trifásico.

Las pérdidas eléctricas o pérdidas de carga se calculan por medio de la suma aritmética de las lecturas de los wattmetros. La corriente de pérdidas eléctricas será el promedio de las lecturas de los ampermetros.

CONCLUSIONES

Una vez realizadas las pruebas en baja tensión y haber obtenido los parámetros necesarios para determinar el estado y características de los transformadores bajo prueba se concluye lo siguiente:

- Para la prueba de resistencia óhmica se obtuvieron lecturas en fracciones de ohm, esto es un buen indicativo de que los devanados se encuentran en buen estado ya que de lo contrario si se tuvieran valores relativamente grandes de resistencia en los devanados las pérdidas en el transformador serían de la misma proporción.
- Para la prueba de resistencia de aislamiento obtuvimos lecturas en el rango de 2000-2600 MΩ para las distintas conexiones en los devanados, por lo que podemos afirmar que los niveles de aislamiento entre los devanados de alta tensión, los de baja tensión y tierra son satisfactorios ya que de lo contrario, si se hubiesen obtenido valores bajos en la resistencia indicarían presencia de humedad en el interior del transformador o en su defecto indicaría un deterioro grande en algún punto del devanado, por donde se produce una fuga de corriente hacia otro elemento.
- Observando los valores de tensión obtenidos y comparándolos con los valores nominales del transformador bajo prueba podemos afirmar que la relación de transformación para cada devanado y sus respectivas derivaciones es muy próxima al valor nominal con una variación menor al 5 %, que es el criterio de aprobación según ANCE.
- Es importante tener identificadas las marcas de polaridad en los transformadores, ya que es un requisito necesario para la conexión de dos o más transformadores en paralelo, por ejemplo en un sistema eléctrico de potencia.
- La lectura obtenida en el wattmetro para la prueba de vacío en el transformador monofásico nos proporciona el valor de las pérdidas magnéticas mientras que el valor de la corriente de excitación está indicada en el amperímetro. Para el transformador trifásico, las pérdidas magnéticas serán la suma aritmética de las lecturas de los wattmetros. La corriente de excitación será el promedio de las lecturas de los amperímetros.
- Las pérdidas eléctricas o pérdidas de carga están dadas por la lectura del wattmetro en la prueba de corto circuito para el transformador

monofásico, mientras que para el transformador trifásico, las pérdidas eléctricas o pérdidas de carga se calculan por medio de la suma aritmética de las lecturas de los wattmetros. La corriente de pérdidas eléctricas será el promedio de las lecturas de los ampermetros.

Los parámetros obtenidos en estas dos pruebas son necesarios para determinar el circuito equivalente del transformador, así como la eficiencia y el porcentaje de regulación de voltaje.

Para el módulo de transformador EMS 8341: 60VA-120/208-0.5/0.3A – 60Hz obtuvimos los siguientes datos:

	Voltaje (V)	Corriente (A)	Potencia (W)
Prueba de circuito abierto	120	0.108	5
Prueba de corto circuito	5	0.5	1.5

TABLA 4.10 Parámetros obtenidos en la prueba de corto circuito y circuito abierto en el transformador monofásico.

Como la prueba de circuito abierto se realizó con el voltaje nominal en las terminales del devanado primario (baja tensión). Por tanto, la resistencia equivalente de la pérdida en el núcleo referida al lado primario es

$$R_{C1} = \frac{V_{oc}^2}{P_{oc}} = \frac{120^2}{5} = 2.88 \text{ K}\Omega$$

La potencia aparente en condiciones sin carga es:

$$S_{oc} = V_{oc}I_{oc} = 120 \times 0.108 = 12.96 \text{ VA}$$

Luego, la potencia reactiva es

$$Q_{oc} = \sqrt{S_{oc}^2 - P_{oc}^2} = \sqrt{12.96^2 - 5^2} = 11.96 \text{ VAR}$$

Por tanto, la reactancia de magnetización referida al primario es

$$X_{m1} = \frac{V_{oc}^2}{Q_{oc}} = \frac{120^2}{11.96} = 1.2 \text{ K}\Omega$$

La resistencia de pérdida en el núcleo y la reactancia de magnetización referidas al lado secundario se obtuvieron como sigue:

$$R_{c2} = r^2 R_{c1} = (0.577^2)(2.88 \times 10^3) = 958.84 \Omega$$

$$X_{m2} = r^2 X_{m1} = (0.577^2)(1.2 \times 10^3) = 399.51 \Omega$$

Puesto que la corriente de cortocircuito es de 5 A referidos al lado secundario tenemos

$$R_{e2} = \frac{P_{sc}}{I_{sc}^2} = \frac{1.5}{0.5^2} = 6 \Omega$$

$$Z_{e2} = \frac{V_{sc}}{I_{sc}} = \frac{5}{0.5} = 10 \Omega$$

$$X_{e2} = \sqrt{10^2 - 6^2} = 8 \Omega$$

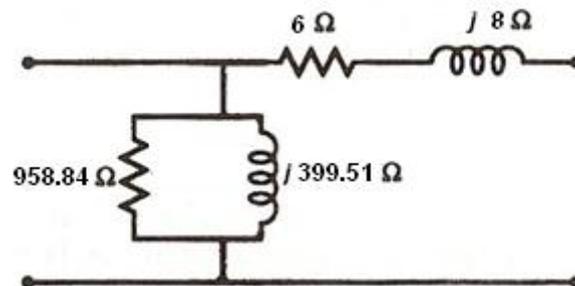


Figura 4.13. Circuito equivalente aproximado observado desde el lado secundario para el transformador monofásico bajo prueba.

Los parámetros del devanado referido al lado de bajo voltaje

$$R_{e1} = \frac{R_{e2}}{r^2} = \frac{6}{0.577^2} = 18 \Omega$$

$$X_{e1} = \frac{X_{e2}}{r^2} = \frac{8}{0.577^2} = 24 \Omega$$

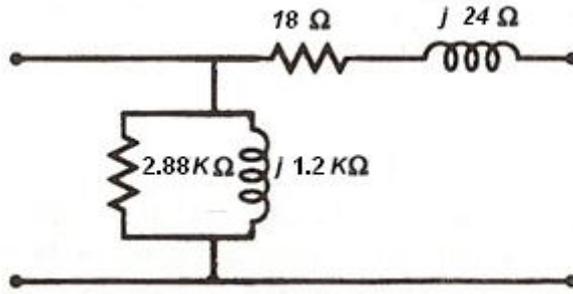


Figura 4.14. Circuito equivalente aproximado observado desde el lado primario para el transformador monofásico bajo prueba.

De acuerdo al circuito equivalente aproximado referido al primario (figura 4.14) observamos que:

$$R_{C1} = 2.88 \text{ K}\Omega$$

$$X_{m1} = 1.2 \text{ K}\Omega$$

$$R_{e1} = 18 \Omega$$

$$X_{e1} = 24 \Omega$$

$$r = \frac{120}{208} = 0.577$$

$$S_{nom} = 60 \text{ VA}$$

$$V_2 = 208 \text{ V}$$

$$I_2 = \frac{60}{208} = 0.29 \text{ A}$$

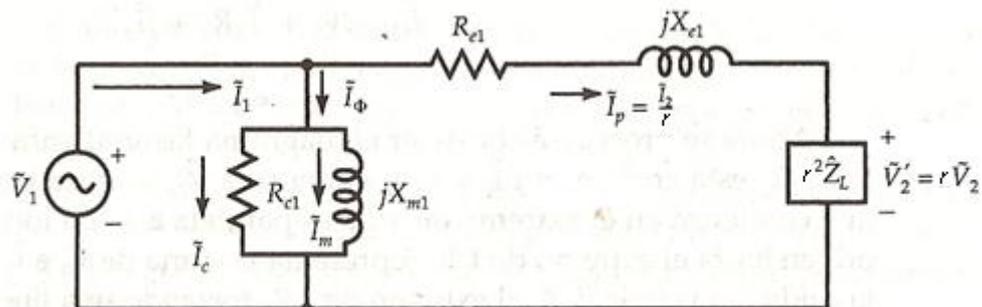


Figura 4.15. Circuito equivalente aproximado de un transformador observado desde el lado primario.

Con base en el circuito de la figura 4.15 se tiene que

$$I_p = \frac{I_2}{r} = \frac{0.29}{0.577} = 0.5 \text{ A}$$

$$V'_2 = rV_2 = (0.577)208 = 120 \text{ V}$$

Luego,

$$V_1 = V'_2 + I_p(R_{e1} + jX_{e1}) = 120 + 0.5(18 + j24) = 129.56 \angle 5.31^\circ \text{ V}$$

La pérdida en el núcleo y las corrientes de magnetización son:

$$I_c = \frac{V_1}{R_{c1}} = \frac{129.56 \angle 5.31^\circ}{2880} = 0.045 \angle 5.31^\circ \text{ A}$$

$$I_m = \frac{V_1}{X_{m1}} = \frac{129.56 \angle 5.31^\circ}{1200 \angle 90^\circ} = 0.108 \angle -84.69^\circ \text{ A}$$

La corriente suministrada por la fuente es:

$$I_1 = I_p + I_c + I_m = 0.5 + 0.045 \angle 5.31^\circ + 0.108 \angle -84.69^\circ = 0.56 \angle -10.55^\circ \text{ A}$$

La potencia de entrada es:

$$P_{\text{ent}} = V_1 I_1 \cos \theta = (129.56)(0.56) \cos(15.86) = 69.8 \text{ W}$$

La potencia de salida es:

$$P_{\text{sal}} = V'_2 I_p \cos \theta = (120)(0.5) \cos(0) = 60 \text{ W}$$

Por lo tanto, la eficiencia del transformador bajo prueba es:

$$\eta = \frac{P_{\text{sal}}}{P_{\text{ent}}} = \frac{60}{69.8} \times 100 = 85.96\%$$

La regulación de voltaje es:

$$RV\% = \frac{V_1 - V'_2}{V'_2} \times 100 = \frac{129.56 - 120}{120} \times 100 = 7.96\%$$

BIBLIOGRAFÍA

Bha S. Guru, Huseyin R. Hiziroglu, *Máquinas Eléctricas y Transformadores*. Editorial, Oxford. México, 2003.

NORMA MEXICANA ANCE NMX-j-169-ANCE-2004, *Transformadores y autotransformadores de distribución y potencia. Métodos de Prueba*. México 2004.

NORMA MEXICANA ANCE NMX-j-284-ANCE-2006, *Transformadores y autotransformadores de potencia. Especificaciones*. México 2004.

Víctor Pérez Amador Barrón. *Pruebas de Equipo Eléctrico*. Editorial, Limusa. México, 1985.

Stephen J. Chapman, *Máquinas Eléctricas*. Editorial, McGraw-Hill. Colombia, 1999.

Pedro Ponce Cruz, Javier Sampé López. *Máquinas eléctricas y técnicas modernas de control*. Editorial, Alfaomega. México, 2008.

Donald V. Richardson, Arthur J. Caisse, Jr. *Máquinas Eléctricas Rotativas y Transformadores*. Editorial Prentice Hall. México, 1997.

Enríquez Harper Gilberto. *Experimentos con máquinas eléctricas: Máquinas rotatorias y transformadores*. Editorial, Limusa. México, 2005.

DEFINICIONES

1.- *Transformador*: dispositivo eléctrico, que por inducción electromagnética transfiere energía eléctrica de uno o más circuitos, a uno o más circuitos a la misma frecuencia y transformando usualmente los valores de tensión y corriente.

2.- *Transformador de potencia*: transformador que tiene una capacidad mayor de 500 kVA.

3.- *Transformador sumergido en líquido aislante*: transformador en el cual el núcleo y los devanados se encuentran sumergidos en líquido aislante.

4.- *Transformador prototipo*: transformador de tipo particular que representa a todo un conjunto con características nominales iguales. Un transformador deja de ser prototipo si presenta características que se desvían del resto del conjunto que representa.

5.- *Autotransformador*: transformador en el que los dos devanados están interconectados eléctricamente.

6.- *Capacidad nominal*: aquella que suministra el transformador cuando circula en sus devanados la corriente nominal a tensión y frecuencia nominales en forma continua, sin exceder los límites de elevación de temperatura especificados.

NOTAS

1 Ambos devanados de un transformador de dos devanados tienen la misma capacidad nominal que, por definición, es la capacidad nominal del transformador.

2 Para transformadores de varios devanados debe establecerse el valor de la capacidad nominal de cada uno de ellos.

6.- *Características nominales*: valores numéricos asignados a las cantidades que definen la operación del transformador en las condiciones especificadas.

7.- Conexiones

7.1. *Conexión delta*: aquella en la que los devanados de un transformador trifásico o los de tres monofásicos asociados en un banco trifásico de la misma tensión, se conectan en serie para formar, un circuito cerrado simétrico.

7.2. *Conexión en delta abierta*: aquella en la que los devanados de dos transformadores monofásicos asociados a un sistema trifásico de la misma tensión, se conectan en forma asimétrica en serie quedando un circuito abierto.

7.3. *Conexión estrella*: conexión de devanados en la que un extremo de cada uno de los devanados de fase de un transformador polifásico, o de cada uno de los devanados de la misma tensión nominal de transformadores monofásicos asociados en un banco polifásico, se conecta a un punto común (el neutro) y el otro extremo a su terminal de línea apropiada.

8.- *Corriente de excitación*: corriente que circula a través de las terminales de un devanado del transformador cuando se le aplica tensión y frecuencia nominal, manteniéndose las terminales de los otros devanados en circuito abierto. Debe expresarse en por ciento con respecto a la corriente nominal del devanado bajo prueba.

NOTAS

1 Para transformadores con varios devanados, este por ciento se refiere al devanado de mayor capacidad.

2 Para transformadores polifásicos, las corrientes de excitación en las diferentes terminales pueden ser diferentes. Si los valores de estas corrientes no se dan separadas, la corriente de excitación es la media aritmética de estas corrientes.

9.- *Corriente nominal*: corriente que fluye a través de una terminal de un devanado, calculada, dividiendo la capacidad nominal del devanado entre la tensión nominal del mismo.

10.- *Derivaciones*: porción del devanado compuesta de una o más espiras, cuya finalidad es modificar la relación de tensiones y corrientes.

11.- *Desplazamiento angular*: ángulo entre el vector que representa la tensión de línea a neutro de una fase de alta tensión, y el vector que representa la tensión de línea a neutro, en la fase correspondiente en el lado de baja tensión. Se conviene que los fasores giran en sentido contrario al de las manecillas del reloj.

12.- *Devanado*: conjunto de espiras que forman un circuito eléctrico asociado con una de las tensiones asignadas al transformador.

NOTA

Para un transformador polifásico, el devanado es la combinación de los devanados de fase.

13.- *Devanado auxiliar*: devanado destinado a alimentar una carga pequeña comparada con la capacidad total del transformador.

14.- *Devanado primario*: devanado por donde es alimentado el transformador. Para transformadores reductores es el de mayor tensión y para transformadores elevadores es el de menor tensión.

15.- *Devanado secundario*: devanado donde es conectada la carga. Para transformadores reductores es el de menor tensión y para transformadores elevadores es el de mayor tensión.

16.- *Devanado de fase*: conjunto de espiras que constituye una fase del sistema polifásico.

NOTA - El término devanado de fase no debe utilizarse para identificar el conjunto de devanados de una fase cualquiera.

17.- *Devanado terciario*: devanado adicional de un transformador, el cual puede llevar sus terminales al exterior para conectarse a otro circuito, o bien permanecer interno para fines de operación en el sistema como devanado estabilizador.

18.- *Devanado estabilizador*: devanado suplementario conectado en delta, especialmente usado en un transformador conectado en estrella-estrella, para reducir la impedancia de secuencia cero del transformador.

NOTAS

1 La reducción de esta impedancia puede ser necesaria, por ejemplo, para reducir la magnitud de la tensión de tercera armónica o para estabilizar las tensiones al neutro.

2 Un devanado se considera como estabilizador, si sus terminales no son llevadas al exterior para conectarse a un circuito externo. Sin embargo, se pueden sacar una o dos puntas (adyacentes), destinadas para conexión a tierra; por ejemplo, en un transformador trifásico, si se sacan las tres terminales de la delta.

19.- *Devanados abiertos*: devanados de fase de un transformador polifásico que no están interconectados dentro del transformador.

20.- *Diagrama vectorial*: notación convencional que indica las conexiones respectivas de los devanados de alta, media y baja tensión y sus relativos desplazamientos de fase.

21.- *Elevación de temperatura de los devanados*: diferencia entre la temperatura promedio de los devanados obtenida por el método de resistencia óhmica y la temperatura promedio del medio ambiente.

22.- *Frecuencia nominal*: frecuencia de operación para la cual está diseñado el transformador.

23.- *Por ciento de impedancia*: relación de tensiones expresada en por ciento entre la tensión de impedancia y la tensión nominal.

24.- Nivel de aislamiento: es la combinación de valores de tensión (a baja frecuencia e impulso) que caracteriza el aislamiento de cada uno de los devanados y sus partes asociadas, con respecto a su capacidad para soportar esfuerzos dieléctricos.

25.- *Pérdidas*

25.1 *Pérdidas debidas a la carga*: potencia activa que se consume cuando circula la corriente nominal a través de los devanados, a frecuencia nominal y se expresan en watts.

25.2 *Pérdidas en vacío*: potencia activa que consume el transformador, cuando se le aplica tensión nominal a frecuencia nominal en las terminales de un devanado, estando los otros en circuito abierto, y se expresa en watts.

25.3 *Pérdidas totales*: suma de las pérdidas en vacío y las pérdidas debidas a la carga.

26.- *Relación de transformación*: relación de tensiones (medida en vacío) de un devanado con respecto a otro devanado.

27.- *Tensión nominal*: aquella a la que se refieren sus características de operación y funcionamiento.