

El Transformador

18

Introducción

El transformador se puede considerar como una máquina eléctrica estática (sin movimiento) que es capaz de cambiar los 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 la corriente alterna y no la corriente continua en la producción, transporte, distribución y consumo de la electricidad es que este tipo de corriente es muy fácil de elevar y reducir su tensión mediante el transformador. Gracias a los transformadores se puede 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 efecto Joule. Con ellos también se puede reducir la tensión, con el fin de poder distribuirla y consumirla en las industrias y viviendas, a valores que sean seguros para las personas que manipulan los sistemas eléctricos.

Aparte de estas aplicaciones, los transformadores también se utilizan para separar eléctricamente dos circuitos, alimentar con pequeñas tensiones circuitos de mando de sistemas automáticos, alimentar todo tipo de aparatos electrónicos (televisores, equipos de sonido, receptores de radio, ordenadores, etc.), 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.

Contenido

- > Funcionamiento en vacío y carga del transformador.
- > Ensayo en vacío y cortocircuito del transformador.
- > Pérdidas en el cobre y en el hierro.
- > Tensión de cortocircuito.
- > Intensidad de cortocircuito accidental.
- > Caída de tensión.
- > Rendimiento.
- > Autotransformadores.
- > Transformadores trifásicos.
- > Conexión en paralelo de transformadores.
- > Refrigeración de los transformadores.
- > Ensayos de los transformadores.

Objetivos

- ✓ Describir el funcionamiento del transformador.
- ✓ Seleccionar las características de un transformador para una determinada aplicación práctica.
- ✓ Analizar el funcionamiento de un transformador en vacío, en carga y en cortocircuito.
- ✓ Determinar el rendimiento de un transformador.
- ✓ Describir los tipos de ensayos fundamentales y normalizados que se deben realizar con transformadores, identificando las magnitudes que se deben medir y explicando las curvas características que relacionan dichas magnitudes.

18.1 Funcionamiento del transformador

Un transformador posee dos bobinados: uno primario y otro secundario que se arrollan sobre un núcleo magnético común, formado por chapas magnéticas apiladas (Figura 18.1). Por el bobinado primario se conecta la tensión de entrada y por el bobinado secundario obtenemos la tensión de salida. El mismo transformador puede funcionar como elevador o reductor. Así, por ejemplo, con un transformador de 220/125 V, si conectamos el bobinado de 220 V a una red de la misma tensión, obtendremos en el otro bobinado una tensión de salida de 125 V (transformador reductor); a la inversa, si conectamos el bobinado de 125 V a una red de la misma tensión, obtendremos en el otro bobinado una tensión de salida de 220 V (transformador elevador).

$N_1 = \text{N}^\circ$ de espiras del primario

$N_2 = \text{N}^\circ$ de espiras del secundario

$V_1 = \text{Tensión del primario}$

$V_2 = \text{Tensión del secundario}$

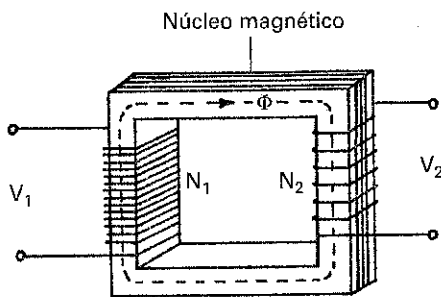


Figura 18.1. Transformador elemental.

¿Cómo consigue cambiar la tensión un transformador? Si observas la Figura 18.1, podrás comprobar que no existe conexión eléctrica entre el bobinado primario y el secundario. ¿Por dónde pasa entonces la energía eléctrica de un bobinado a otro? Estos fenómenos se pueden explicar gracias a la inducción electromagnética.

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 bobinado 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 del 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).

En el caso de que el número de espiras del primario N_1 fuese igual al del secundario N_2 , la tensión V_2 , que se induce en el secundario, sería aproximadamente igual a la aplicada al primario V_1 . Hay que pensar que el flujo que se produce en el primario es proporcional a la tensión aplicada a la bobina y al número de espiras de la misma. Por otro lado, la tensión que se induce en el secundario es proporcional al flujo común y al número de espiras del secundario. Si el número de espiras es igual, la tensión que se induce en el secundario es igual que la administrada por el primario.

En el caso de que el número de espiras del secundario sea mayor que la del primario, la tensión del secundario también será mayor. Volviendo al mismo razonamiento, para un mismo flujo común, en cada una de las espiras del secundario se induce una cierta tensión, por lo que cuantas más espiras tenga este bobinado, más tensión aparecerá en el mismo. El mismo razonamiento se puede hacer para un transformador reductor. En general, se cumple con gran aproximación que:

$$\frac{V_1}{V_2} = \frac{N_1}{N_2} = m \text{ (relación de transformación)}$$

Por lo general, los transformadores monofásicos comerciales presentan la disposición que se aprecia en la Figura 18.2. El núcleo de hierro posee la forma de ventana y está constituido por numerosas chapas magnéticas de pequeño espesor, apiladas unas sobre otras y aisladas entre sí mediante un barniz. Esta disposición reduce considerablemente las pérdidas que aparecen en el hierro por efecto de las corrientes parásitas.

Para formar el paquete de chapas se utilizan tornillos o remaches, procurando que éstos queden aislados eléctricamente de las chapas. Además se tratan adecuadamente las superficies exteriores del núcleo para evitar la corrosión.

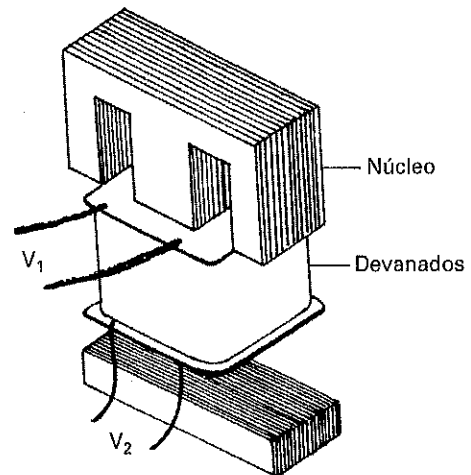


Figura 18.2. Constitución de un transformador monofásico.

Los dos bobinados aparecen arrollados sobre un carrete que abraza la columna central del núcleo. De esta forma, se consigue que el flujo creado por el primario abraze mejor al secundario, reduciéndose considerablemente los flujos de dispersión. El conductor que se utiliza para las bobinas suele ser de cobre aislado mediante un barniz. Las diferentes capas de los bobinados se aíslan eléctricamente mediante papeles especiales, y la separación entre el bobinado primario y secundario se aísla mediante tejidos engrasados.

18.2 Funcionamiento de un transformador ideal

Con la idea de hacer más sencillo el estudio del transformador, comenzaremos considerando que éste es ideal, por lo que no tendremos en cuenta las pérdidas que se puedan dar tanto en los circuitos eléctricos (efecto Joule), como magnéticos (corrientes parásitas, histéresis, dispersión de flujos).

Experiencia 18.1. Conecta a una red de 220 V el primario de un transformador monofásico de 220 /125 V y mide la tensión en vacío en el primario y en el secundario. Con los datos obtenidos en el ensayo averigua la relación de transformación del mismo (Figura 18.3).



Figura 18.3

En estas condiciones conecta un amperímetro en el primario. ¿Cómo es la corriente en vacío por el primario?

Ahora repite la misma experiencia conectando el secundario a una red de 125 V.

Estando conectado el primario a la red eléctrica, conecta una lámpara incandescente al secundario y mide la corriente en el primario y en el secundario (Figura 18.4). ¿Qué relación hay entre ellas?



Figura 18.4

En conclusión, en vacío, la corriente por el primario de un transformador es muy pequeña. Al conectar una carga al secundario, aparece una corriente por el mismo que, a su vez, hace circular una corriente por el primario, cumpliéndose con una cierta aproximación que $V_1/V_2 = I_2/I_1 = m$.

18.2.1 Funcionamiento de un transformador ideal en vacío

Se conecta el primario a la red, mientras que el secundario no se conecta a carga alguna (Figura. 18.5). Por el 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 en la misma, por efecto de autoinducción, 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:

$$e_1 = N_1 \frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$$

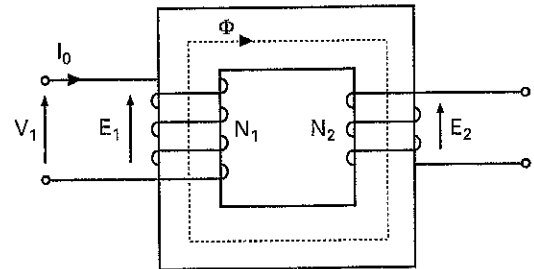


Figura 18.5. Transformador ideal en vacío.

Según la ley de Lenz, esta f.e.m. se opone en todo momento a la causa que la produce, es decir, a la tensión V_1 aplicada al primario. Como se supone que no hay ningún tipo de pérdidas, los valores instantáneos de V_1 y e_1 son iguales y de signos opuestos.

Partiendo de la expresión general de inducción electromagnética (ley de Faraday), para un corriente alterna senoidal, el valor eficaz de esta f.e.m. viene determinado por la expresión:

$$E_1 = 4,44 f N_1 \Phi_{m\acute{a}x}$$

E_1 = f.e.m. eficaz inducida en el primario (V)

f = frecuencia (Hz)

N_1 = número de espiras del primario

$\Phi_{m\acute{a}x}$ = flujo máximo (Wb)

El bobinado secundario es cortado también por el flujo común engendrado por el primario, por lo que se generará en el mismo una f.e.m., que tendrá por valor eficaz:

$$E_2 = 4,44 f N_2 \Phi_{m\acute{a}x}$$

E_2 = f.e.m. eficaz inducida en el secundario (V)

N_2 = número de espiras del secundario

Si dividimos las dos expresiones de las fuerzas electromotrices eficaces, como la frecuencia y el flujo son comunes, obtendremos el siguiente resultado:

$$\frac{E_1}{E_2} = \frac{N_1}{N_2} = m \text{ (relación de transformación)}$$

En definitiva, hemos podido comprobar que la f.e.m. inducidas en ambos bobinados depende del número de espiras de

los mismos. Dado que no existen pérdidas, los valores eficaces de las tensiones en el primario y en el secundario son iguales a sus respectivas f.e.m., cumpliéndose con aproximación que:

$$m = \frac{E_1}{E_2} = \frac{N_1}{N_2} = \frac{V_1}{V_2}$$

Ejemplo: 18.1

En la fabricación de un transformador monofásico se han utilizado 750 espiras en el primario y 1.500 en el secundario. El flujo máximo que aparece en el núcleo magnético es de 3 mWb. Determinar las tensiones en el primario y en el secundario para una frecuencia de 50 Hz, así como la relación de transformación

Solución:

$$E_1 = 4,44 f N_1 \Phi_{\text{máx}} = 4,44 \cdot 50 \cdot 750 \cdot 0,003 = 499,5 \text{ V}$$

$$E_2 = 4,44 f N_2 \Phi_{\text{máx}} = 4,44 \cdot 50 \cdot 1.500 \cdot 0,003 = 999 \text{ V}$$

Lo cual nos indica que es un transformador elevador, siendo su relación de transformación:

$$m = \frac{N_1}{N_2} = \frac{750}{1.500} = 0,5$$

Ejemplo: 18.2

Un transformador ideal con 500 espiras en el primario y 100 en el secundario se conecta a una red de C.A. de 1.900 V, 50 Hz. Averiguar la relación de transformación y la tensión en el secundario.

Solución: $m = \frac{N_1}{N_2} = \frac{500}{100} = 5$

Como el número de espiras del secundario es menor que en el primario, el transformador reducirá la tensión (en este caso 5 veces).

$$m = \frac{V_1}{V_2} \Rightarrow V_2 = \frac{V_1}{m} = \frac{1.900}{5} = 380 \text{ V}$$

18.2.2 Funcionamiento del transformador ideal en carga

Al conectar el secundario del transformador a una carga $Z \angle \phi$, la f.e.m. E_2 hace que aparezca una corriente por la carga I_2 , desfasada un ángulo ϕ de la misma (Figura 18.6).

En un principio podría parecer que la corriente I_2 al recorrer el bobinado secundario tendería a modificar el flujo común ϕ generado por el primario, pero vamos a comprobar cómo esto no ocurre así.

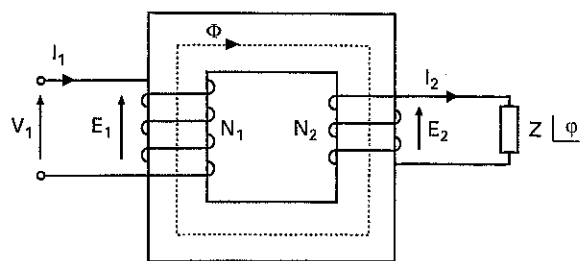


Figura 18.6. Transformador ideal en carga.

Cuando tratamos el funcionamiento en vacío se dijo que la f.e.m. del primario era de sentido opuesto e idealmente igual a la tensión aplicada, es decir:

$$V_1 = E_1 = 4,44 f N_1 \Phi_{\text{máx}} \Rightarrow \Phi_{\text{máx}} = \frac{V_1}{4,44 f N_1}$$

Tanto la frecuencia como el número de espiras permanece constante, por lo que el valor del flujo común depende exclusivamente de la tensión que se aplique al primario.

En el transformador en carga, la intensidad I_2 produce una fuerza magnetomotriz secundaria ($N_2 I_2$) que tiende a modificar el flujo común. Como acabamos de comprobar que dicho flujo permanece fijo con la tensión primaria, el primario se verá forzado a producir otra fuerza magnetomotriz de sentido contrario que equilibre la originada por el secundario. Para ello tendrá que circular una corriente extra por el primario, de tal forma que se cumpla la igualdad de dichas fuerzas magnetomotrices:

$$N_1 I_1 = N_2 I_2$$

Despejando, se cumple que: $\frac{I_2}{I_1} = \frac{N_1}{N_2} = m = \frac{E_1}{E_2}$

En conclusión, vemos que la relación de transformación de intensidades por el primario y por el secundario son inversas a las de las tensiones. Por supuesto que para que esto se cumpla hay que suponer que la corriente de vacío I_0 es despreciable (en un transformador real esta corriente no es superior al 5% de la corriente a plena carga). De aquí también se puede extraer la siguiente relación:

$$E_1 I_1 = E_2 I_2$$

Expresión que nos indica que un transformador ideal, en el cual se supone que las pérdidas de potencia son nulas, la potencia transferida al secundario es igual que la tomada por el primario. De la misma forma, también podemos decir que las potencias activas, reactivas y aparentes absorbidas por el primario son iguales que las suministradas por el secundario:

$$V_1 I_1 \cos \phi_1 = V_2 I_2 \cos \phi_2$$

$$V_1 I_1 \sin \phi_1 = V_2 I_2 \sin \phi_2$$

$$V_1 I_1 = V_2 I_2$$

Ejemplo: 18.3

Un transformador reductor de 220/125 V proporciona energía a una motobomba de 2 KW, 125 V, $\cos \varphi = 0,6$. Suponiendo la corriente de vacío y las pérdidas despreciables, determinar la intensidad por el primario y por el secundario, así como la relación de transformación del mismo. ¿Cuál es la potencia aparente que suministra el transformador?

Solución: Calculamos primero la corriente por el secundario:

$$P = V_2 I_2 \cos \varphi \Rightarrow I_2 = \frac{P}{V_2 \cos \varphi} = \frac{2.000}{125 \cdot 0,6} = 26,7 \text{ A}$$

La relación de transformación, es:

$$m = \frac{V_1}{V_2} = \frac{220}{125} = 1,76$$

La corriente por el secundario la calculamos teniendo en cuenta la relación de transformación:

$$m = \frac{I_2}{I_1} \Rightarrow I_1 = \frac{I_2}{m} = \frac{26,7}{1,76} = 15,2 \text{ A}$$

La potencia aparente que suministra el transformador, es:

$$S = V_2 I_2 = 125 \cdot 26,7 = 3.338 \text{ VA}$$

Ejemplo: 18.4

Una subestación de transformación es alimentada con una red trifásica a 45 KV y 50 Hz, reduciendo la tensión hasta 10 KV para su distribución. Para ello dispone de un transformador reductor de 45 KV/10 KV. Determinar las intensidades de línea por el primario y por el secundario del transformador si la demanda de potencia es de 10 MVA.

Solución: Para resolver este ejercicio nos valdremos de las expresiones de potencia aparente trifásica: $S = \sqrt{3} V_c I_L$

La intensidad por el primario, es:

$$I_{1L} = \frac{S}{\sqrt{3} V_{1C}} = \frac{10.000.000}{\sqrt{3} \cdot 45.000} = 128 \text{ A}$$

La intensidad por el secundario, es:

$$I_{2L} = \frac{S}{\sqrt{3} V_{2C}} = \frac{10.000.000}{\sqrt{3} \cdot 10.000} = 577 \text{ A}$$

Ejemplo 18.5

Se precisa de un pequeño transformador monofásico de 500 VA de potencia, con una relación de transformación

de 220/12 V y una frecuencia de 50 Hz. La chapa magnética con la que se va a construir el núcleo posee una inducción máxima de 1,3 T. Considerando el transformador ideal, calcular el número de espiras por el primario y por el secundario. Calcular también la sección de los conductores por el primario y por el secundario si se admite una densidad de corriente de 4 A/mm².

Solución: Para calcular el número de espiras necesitamos conocer primero el flujo magnético máximo por el núcleo. Conocemos la inducción magnética máxima pero no la sección del núcleo. Ésta se puede calcular con aproximación mediante la siguiente expresión:

$$s_n = \sqrt{S} = \sqrt{500} = 22,4 \text{ cm}^2$$

El flujo máximo que se da en el núcleo para una inducción de 1,3 T es:

$$\Phi_{\text{máx}} = s_n B_{\text{máx}} = 22,4 \cdot 10^{-4} \cdot 1,3 = 0,0029 \text{ Wb}$$

Partiendo de la expresión de la fuerza electromotriz eficaz podemos calcular ya el número de espiras del primario y del secundario:

$$E_1 = V_1 = 4,44 \Phi_{\text{máx}} f N_1 \Rightarrow N_1 = \frac{V_1}{4,44 \Phi_{\text{máx}} f} = \frac{220}{4,44 \cdot 0,0029 \cdot 50} = 342 \text{ espiras}$$

$$N_2 = \frac{V_2}{4,44 \Phi_{\text{máx}} f} = \frac{12}{4,44 \cdot 0,0029 \cdot 50} = 19 \text{ espiras}$$

Para determinar las secciones de los conductores de ambos bobinados calcularemos primero las intensidades nominales por los mismos:

$$I_1 = \frac{S}{V_1} = \frac{500}{220} = 2,3$$

$$I_2 = \frac{S}{V_2} = \frac{500}{12} = 41,7 \text{ A}$$

La sección de los conductores la calculamos una vez que conocemos que la densidad que admiten los conductores que se van a emplear para los bobinados es de 4 A/mm²:

$$S_1 = \frac{2,3 \text{ A}}{4} = 0,6 \text{ mm}^2 \quad S_2 = \frac{41,7 \text{ A}}{4} = 10,4 \text{ mm}^2$$

18.3 Transformador real

Experiencia 18.2. Conecta un transformador de 220/125 V a una red de 220 V y mide la tensión de salida en vacío. A continuación, conecta una lámpara incandescente a la salida del transformador y mide la tensión en el secundario. Seguidamente, ir conectando más lámparas a la salida del transformador e ir comprobando la tensión de salida.

Se podrá comprobar que la tensión que proporciona el transformador a su salida disminuye al ir aumentando la carga. Esto es debido a que al conectar una carga en el secundario aparece una corriente por este bobinado y, a su vez, aumenta la corriente por el primario. Estas corrientes producen caídas de tensión en las resistencias y reactancias inductivas de ambos bobinados. También se puede comprobar que la temperatura del transformador aumenta con la carga, debido al aumento de las pérdidas.

Para hacer el estudio del transformador real hay que tener en cuenta los siguientes aspectos:

a) Tanto el bobinado primario como el secundario poseen una cierta resistencia óhmica, R_1 y R_2 , que habrá que tener en cuenta, ya que provocarán una cierta caída de tensión y una pérdida de potencia por efecto Joule cuando circule corriente por ambos bobinados (Figura 18.7).

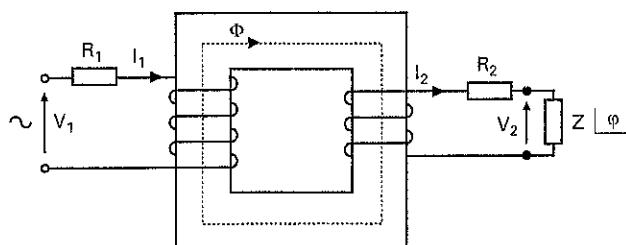


Figura 18.7. Resistencias óhmicas de los devanados en un transformador real.

b) El núcleo del transformador está constituido por chapas magnéticas de alta permeabilidad, bajo campo coercitivo y baja resistencia óhmica, con el fin de reducir las pérdidas en los circuitos magnéticos, debidas sobre todo a la histéresis y las corrientes parásitas o de Foucault. A pesar de ello, todavía persisten estos fenómenos, aunque no en gran medida, que hacen que la potencia transferida al secundario del transformador nos sea exactamente la misma que la absorbida por el mismo de la red.

c) El flujo no es del todo común, ya que éste tiende a dispersarse por el propio chasis del transformador e incluso por el aire, lo que hace que dicho flujo de dispersión sólo atraviese los propios bobinados que lo han producido (Φ_{d1} lo produce N_1 , y Φ_{d2} lo produce N_2) (Figura 18.8). Esto origina a su vez una f.e.m. de autoinducción en cada uno de los mismos, que se puede sustituir con bastante aproximación por bobinas ficticias en serie con el primario y el secundario de reactancias X_{d1} y X_{d2} .

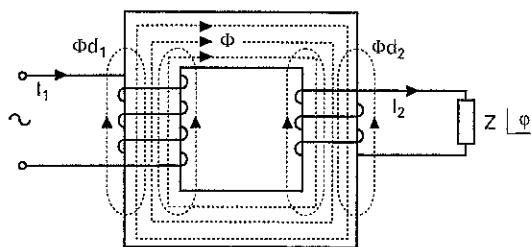


Figura 18.8. Flujo de dispersión en un transformador real.

Teniendo en cuenta estas consideraciones, el circuito equivalente podría quedar tal como se indica en la Figura 18.9.

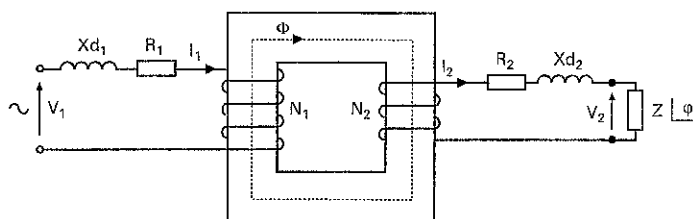


Figura 18.9. Circuito equivalente de un transformador real.

R_1 = resistencia del primario

R_2 = resistencia del secundario

X_{d1} = reactancia de dispersión del primario

X_{d2} = reactancia de dispersión del secundario

18.3.1 Transformador real en vacío

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. El bobinado primario se comporta como si fuese una inductancia, y la pequeña corriente de vacío que aparece depende fundamentalmente de la tensión aplicada a dicho bobinado. En la Tabla 18.1, que se expone más adelante, se puede comprobar el valor de la corriente de vacío de diferentes transformadores.

¿Qué ocurre si conectamos el primario de un transformador de relación 220/125 V a una tensión de 380 V?

Dado que el transformador es reductor, con una relación de transformación igual a $m = 220/127 = 1,73$, en un principio cabría esperar una tensión por el secundario igual a $380/1,73 = 220$ V. En la práctica esto no se cumple. Además se aprecia un considerable aumento de la corriente de vacío y de la temperatura en el transformador, que puede llegar a destruirlo.

La razón de este comportamiento hay que buscarla en el hecho de que cuando aumentamos la tensión aplicada al primario, el flujo magnético tiende también a aumentar. Dado que el núcleo magnético se dimensiona normalmente para trabajar en niveles de inducción de saturación magnética para valores de la tensión nominal, para conseguir un aumento sustancial del flujo magnético y de la inducción se necesita aumentar considerablemente la corriente magnetizante de

vacío. Esta corriente elevada puede llegar a destruir el bobinado por sobrecalentamiento.

De esta forma, hay que indicar que no se deben conectar los bobinados de un transformador a tensiones más elevadas que las indicadas en sus características nominales.

18.3.2 Pérdidas en el hierro

El núcleo del transformador está sometido constantemente a un campo magnético alterno, lo que produce los fenómenos de histéresis y de corrientes parásitas. Estos fenómenos, producen unas pérdidas en el núcleo de hierro que se transforman en calor y que reducen el rendimiento del transformador.

¿Qué ocurre si conectamos un transformador de 50 Hz a una red de 100 Hz?

Dado que los fenómenos de histéresis y de corrientes parásitas dependen de la frecuencia, al aumentar ésta también aumentan las pérdidas en el hierro, produciéndose sobrecalentamientos en el núcleo que, al ser transmitidos a los bobinados, pueden llegar a destruirlos.

En la Tabla 18.1 se puede comprobar el valor de las pérdidas en el hierro (pérdidas en vacío) de diferentes transformadores. Para determinar las pérdidas en el hierro se realiza el ensayo en vacío del transformador.

18.3.3 Ensayo en vacío del transformador

Mediante una sencilla experiencia se puede determinar:

- La relación de transformación (m)
- La corriente de vacío (I_0)
- Las pérdidas en el hierro (P_{Fe})

Para llevar a cabo este ensayo se deja abierto el circuito del secundario y se conecta un voltímetro (V_1) en el primario y otro en el secundario (V_2). Además se intercala un amperímetro (A) y un vatímetro (W) en el circuito primario (Figura 18.10).

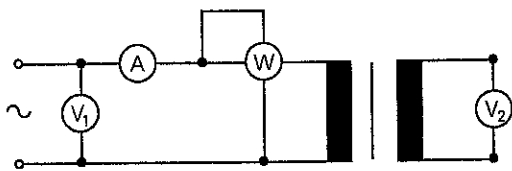


Figura 18.10. Ensayo en vacío de un transformador monofásico.

El amperímetro indica la corriente de vacío I_0 .

El voltímetro V_2 mide la fuerza electromotriz E_2 inducida en el secundario, y el V_1 la tensión de red V_1 aplicada al primario.

La relación de transformación exacta se calcula mediante la expresión:

$$m = \frac{E_1}{E_2}$$

Dado que la corriente de vacío es tan pequeña, se pueden despreciar las caídas de tensión en el primario en relación a los valores de V_1 y E_1 . Por lo que se puede afirmar con bastante aproximación que en vacío se cumple que:

$$V_1 \approx E_1$$

Por lo que la relación de transformación se obtiene del cociente de las lecturas de los dos voltímetros:

$$m = \frac{V_1}{V_2}$$

El vatímetro indica la potencia de vacío (P_0), que será igual a:

$$P_0 = V_1 I_0 \cos \phi_0$$

Esta potencia será la suma de las pérdidas en vacío producidas en los conductores de cobre de la bobina primaria por efecto Joule ($P_{0cu} = R_1 I_0^2$) más las originadas en el hierro por efecto de las corrientes parásitas y por histéresis. Como la corriente I_0 es muy pequeña, se puede considerar que las pérdidas en los conductores de cobre en vacío son prácticamente despreciables a las del hierro. Por otro lado, las pérdidas en el hierro dependen, sobre todo, del flujo magnético, que como ya hemos visto permanece prácticamente constante en carga y en vacío, ya que su valor depende de la tensión de red V_1 . Por todo esto, se puede decir que las pérdidas en el cobre se miden con bastante aproximación con el vatímetro conectado en vacío.

$$P_0 \approx P_{Fe}$$

Ejemplo: 18.6

Se somete a un ensayo en vacío a un transformador monofásico de 5 KVA, 1000/380 V, 50 Hz, obteniendo los siguientes resultados: voltímetro en el primario (V_1) = 1.000 V; voltímetro en el secundario (V_2) = 380 V; amperímetro en el primario (A) = 0,5 A, y vatímetro en el primario (W) = 30 W. Determinar: la relación de transformación, las pérdidas en el hierro y la corriente de vacío.

Solución: La relación de transformación, es:

$$m = \frac{V_1}{V_2} = \frac{1.000}{380} = 2,63$$

Las pérdidas en el hierro, son:

$P_{Fe} = \text{lectura del vatímetro} = 30 \text{ W}$

La corriente de vacío, es:

$I_0 = \text{lectura del amperímetro} = 0,5 \text{ A}$

18.3.4 Transformador real en carga

Para hacer el estudio del transformador real en carga (Figura 18.11), habrá que tener en cuenta las mismas consideraciones que para el ideal, es decir, el flujo magnético tiende a ser el mismo en carga y en vacío. Para que esto se cumpla, la fuerza magnetomotriz producida por las bobinas del transformador debe ser igual en carga que en vacío. La expresión de los amperivoltios puede quedar así:

$$N_1 \vec{I}_0 = N_2 \vec{I}_2 + N_1 \vec{I}_1$$

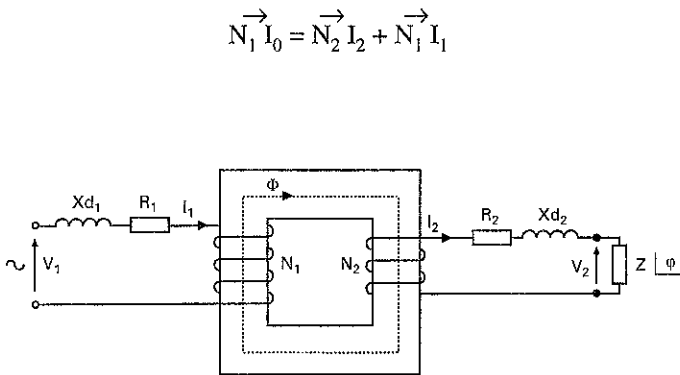


Figura 18.11. Transformador real en carga.

Esta ecuación se explica de la siguiente forma: al conectar una carga en el secundario, circula una corriente I_2 por el bobinado secundario que produce la fuerza magnetomotriz $N_2 I_2$. Esta tiende a modificar el flujo común creado por la f.m.m. de vacío $N_1 I_0$, pero como esto no es posible, en el primario aparece una corriente I_1 que produce otra f.m.m. $N_1 I_1$ para poder compensar los efectos de la producida por el secundario.

A plena carga, la corriente de vacío se puede considerar despreciable respecto a las corrientes del primario y el secundario, por lo que en valores algebraicos se cumple que:

$$I_1 = \frac{I_2}{m} \Rightarrow m = \frac{I_2}{I_1} = \frac{N_1}{N_2}$$

Cuando el transformador trabaja con valores muy por debajo de su carga nominal, esta última apreciación es bastante inexacta.

Dado que tanto en el primario como en el secundario existe resistencia óhmica y reactancia inductiva, al circular por ellos la corriente primaria y secundaria, aparece una serie de caídas de tensión en ambos bobinados que hace que en carga la relación de tensiones primaria y secundaria no coincida con la relación de transformación.

18.4 Circuito equivalente en cortocircuito del transformador

Para poder valorar con aproximación y con una cierta sencillez los fenómenos que producen las resistencias y reactancias de los bobinados de un transformador se utiliza normalmente un circuito equivalente del transformador que produzca con bastante aproximación los mismos efectos que el real y que permita, a su vez, determinar las relaciones fundamentales (caída de tensión en el secundario, intensidad de cortocircuito, pérdidas en los conductores por efecto Joule).

Para encontrar este circuito se cortocircuita el secundario y se hace pasar por el primario la corriente nominal I_{1n} a una tensión de red reducida ($V_{cc} = \text{tensión de cortocircuito aplicada al primario}$) (Figura 18.12). Si en estas condiciones tomamos al transformador como una carga, desde el primario se observará que existe una impedancia que consta de una resistencia de cortocircuito R_{cc} en serie con una reactancia de cortocircuito X_{cc} .

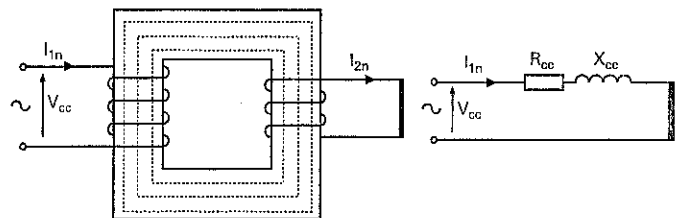


Figura 18.12. Circuito equivalente en cortocircuito del transformador.

De tal forma que se cumplen las siguientes relaciones (según el triángulo de impedancias de la Figura 18.13).

$$Z_{cc} = \sqrt{R_{cc}^2 + X_{cc}^2}$$

$$V_{cc} = Z_{cc} I_{1n}$$

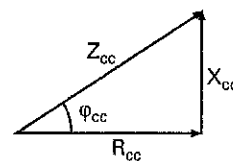


Figura 18.13

Este circuito equivalente indica que el transformador posee una resistencia R_{cc} , vista desde el primario, que suma los efectos de las resistencias del primario y del secundario. La X_{cc} da el valor de la reactancia total en el primario y en el secundario.

Como ya estudiaremos más adelante, la tensión de cortocircuito V_{cc} que es necesario aplicar al transformador con el secundario en cortocircuito y para que circule la intensidad nominal primaria, será de mucha utilidad para conocer a fondo el transformador. En realidad el valor que más nos va a interesar va a ser el del valor porcentual de esta tensión referido a la tensión primaria. Este valor se expresa mediante la letra u_{cc} :

$$u_{cc} = \frac{V_{cc}}{V_1} 100$$

u_{cc} = Valor porcentual de la tensión de cortocircuito referido a la tensión primaria

V_{cc} = Tensión de cortocircuito (V)

V_1 = Tensión nominal primaria

El valor de u_{cc} es muy importante, y por eso figura en la placa de características de los transformadores comerciales. Para hacernos una idea de cómo es este valor, a continuación se expresa una relación de los mismos para transformadores trifásicos: hasta 200 KVA ($u_{cc} = 4\%$); desde 250 a 3150 KVA ($u_{cc} = 6\%$); desde 4 a 5 MVA ($u_{cc} = 8\%$); más de 6,3 MVA ($u_{cc} = 10\%$).

18.5 Ensayo del transformador en cortocircuito

Mediante este ensayo es posible determinar las componentes de cortocircuito, es decir:

- Los parámetros R_{cc} , X_{cc} y Z_{cc}
- Tensión de cortocircuito porcentual y sus componentes
- Las pérdidas en el cobre

Para llevar a cabo este ensayo se cortocircuita el secundario mediante un amperímetro A_2 , tal como se muestra en el circuito de la Figura 18.14. El primario se alimenta a través de una fuente de tensión alterna regulable (por ejemplo con un autotransformador de regulación variable). En el primario se conecta un amperímetro A_1 , un voltímetro V y un vatímetro W.

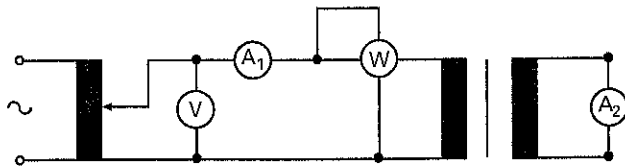


Figura 18.14. Esquema de conexiones para realizar el ensayo en cortocircuito de un transformador monofásico.

Se comienza el ensayo aplicando cero voltios en el primario, se va subiendo poco a poco 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 amperímetro A_1 indique la intensidad nominal primaria I_{1n} , el amperímetro A_2 indicará la intensidad nominal secundaria I_{2n} .

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

$$P_{cu} = R_1 I_{1n}^2 + R_2 I_{2n}^2$$

El vatímetro conectado en el ensayo indica con bastante aproximación el valor de esta potencia. Hay que tener en cuenta que tanto en el bobinado primario como en el secundario circula toda la intensidad nominal. Por otro lado, se pueden considerar las pérdidas en el hierro despreciables, ya que al someter al transformador a una tensión muy baja (la tensión de cortocircuito aplicada es del orden del 5% de la nominal primaria) el flujo con que trabaja el transformador es también muy reducido, por lo que dichas pérdidas son insignificantes con respecto a las del cobre.

$$P_{cu} = \text{lectura de vatímetro}$$

Para determinar la impedancia de cortocircuito aplicaremos la ley de Ohm:

$$Z_{cc} = \frac{V_{cc}}{I_{1n}}$$

Para determinar las componentes R_{cc} y X_{cc} nos valemos del triángulo de impedancias (Figura 18.13), que una vez conocido el ángulo φ_{cc} , podrán ser determinadas de la siguiente forma:

$$R_{cc} = Z_{cc} \cos \varphi_{cc}$$

$$X_{cc} = Z_{cc} \sin \varphi_{cc}$$

El ángulo φ_{cc} lo obtenemos de la potencia de cortocircuito. El vatímetro nos indica dicha potencia, que será igual a:

$$P_{cc} = V_{cc} I_{1n} \cos \varphi_{cc} \Rightarrow \cos \varphi_{cc} = \frac{P_{cc}}{V_{cc} I_{1n}}$$

Al fluir la corriente nominal por la resistencia y reactancia de cortocircuito, aparece en cada una de ellas una caída de tensión, siendo en la primera igual a $R_{cc} I_{1n}$ y en la segunda igual a $X_{cc} I_{1n}$, de tal forma que la tensión de cortocircuito V_{cc} aplicada sea la suma vectorial de éstas, tal como se puede apreciar en el diagrama vectorial de la Figura 18.15.

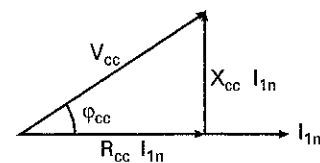


Figura 18.15

Si expresamos cada una de estas tensiones en valores porcentuales, tendremos que:

$$u_{cc} = \frac{V_{cc}}{V_1} 100; \quad u_{Rcc} = \frac{R_{cc} I_{1n}}{V_1} 100; \quad u_{Xcc} = \frac{X_{cc} I_{1n}}{V_1} 100$$

u_{Rcc} = Caída de tensión óhmica de cortocircuito porcentual

u_{Xcc} = Caída de tensión inductiva de cortocircuito porcentual

Estas tensiones se pueden representar también en un diagrama vectorial (Figura 18.16), con sus correspondientes relaciones.

$$u_{Rcc} = u_{cc} \cos \varphi_{cc}$$

$$u_{Xcc} = u_{cc} \sin \varphi_{cc}$$

Para hacernos una idea del orden de magnitud de algunas de las características de los transformadores, en la Tabla 18.1 se exponen las recomendaciones de UNESA 5 201 B para transformadores trifásicos.

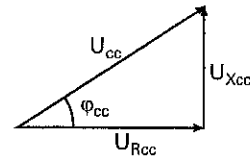


Figura 18.16. Triángulo de tensiones de cortocircuito porcentuales.

Potencia KVA	Conexión	Pérdidas en vacío W	Pérdidas en c.c.		Tensión c.c. %	Corriente en vacío	
			230 V W	398 V %		100%	110%
Series 17,5 y 24 KV							
10	Yz11	105	360	360	4	7,0	21,0
25	Yz11	145	800	800	4	5,1	15,3
50	Yz11	210	1380	1380	4	4,3	12,9
100	Yz11	345	2340	2340	4	3,0	10,5
160	Dy11	490	3150	3150	4	2,4	8,4
250	Dy11	675	4010	4010	4	2,0	7,0
400	Dy11	990	5780	5780	4	1,8	6,3
630	Dy11	1350	8750	8270	4	1,7	6,0
800	Dy11	1660	12000	10200	5	1,6	5,6
1000	Dy11	1950	13900	12100	5	1,5	5,3
Series 36 kV							
25	Yz11	160	800	800	4,5	5,6	16,8
50	Yz11	230	1380	1380	4,5	4,7	14,1
100	Yz11	380	2340	2340	4,5	3,3	11,6
160	Dy11	540	3330	3330	4,5	2,7	9,5
250	Dy11	810	4230	4230	4,5	2,4	8,4
400	Dy11	1170	6210	6210	4,5	2,2	7,7
630	Dy11	1538	9200	8800	4,5	2,0	7,0
800	Dy11	1870	12600	10800	5,5	1,8	6,3
1000	Dy11	2139	14400	12600	5,5	1,7	6,0

Tabla 18.1. Recomendaciones UNESA 5 201 B para transformadores trifásicos.

Ejemplo: 18.7

Al realizar un ensayo en cortocircuito a un transformador monofásico de 250 KVA, tensiones 24.000/398 V, es necesario aplicar al lado de alta tensión una tensión de 960 V para que por el primario circule la corriente nominal. Si la potencia absorbida en el ensayo es de 4.010 W, averiguar: a) las corrientes nominales del primario y del secundario; b) las pérdidas en el cobre para la potencia nominal; c) la tensión de cortocircuito y sus componentes; d) los parámetros R_{cc} , X_{cc} y Z_{cc} ; e) las pérdidas en el cobre cuando el transformador trabaje a la mitad de la carga.

Solución: a) Mediante la expresión general de potencia aparente determinamos las corrientes nominales de ambos devanados:

$$I_{In} = \frac{S_n}{V_{In}} = \frac{250.000}{24.000} = 10,4 \text{ A}$$

$$I_{2n} = \frac{S_n}{V_{2n}} = \frac{250.000}{398} = 628 \text{ A}$$

b) Las pérdidas en el cobre a la potencia nominal coinciden con la potencia de cortocircuito medida en el ensayo:

$$P_{cu} = P_{cc} = 4.010 \text{ W}$$

También podemos determinar el factor de potencia de cortocircuito:

$$\cos \varphi_{cc} = \frac{P_{cc}}{V_{cc} I_{In}} = \frac{4.010}{960 \cdot 10,4} = 0,4 \Rightarrow \varphi_0 = 66,3^\circ$$

c) La tensión porcentual de cortocircuito la determinamos a partir de V_{cc} :

$$u_{cc} = \frac{V_{cc}}{V_{In}} \cdot 100 = \frac{960}{24.000} \cdot 100 = 4 \%$$

Las caídas de tensión $u_{R_{cc}}$ y $u_{X_{cc}}$ las determinamos a partir del triángulo de tensiones de cortocircuito:

$$u_{R_{cc}} = u_{cc} \cos \varphi_{cc} = 4 \cdot 0,4 = 1,6 \%$$

$$u_{X_{cc}} = u_{cc} \sin \varphi_{cc} = 4 \cdot \sin 66,3^\circ = 3,7 \%$$

d) Determinaremos ahora la impedancia de cortocircuito y su componentes:

$$Z_{cc} = \frac{V_{cc}}{I_{1n}} = \frac{960}{10,4} = 92,3 \Omega$$

$$R_{cc} = Z_{cc} \cos \varphi_{cc} = 92,3 \cdot 0,4 = 36,9 \Omega$$

$$X_{cc} = Z_{cc} \sin \varphi_{cc} = 92,3 \cdot \sin 66,3 = 84,5 \Omega$$

e) Se puede decir que las pérdidas en el cobre vienen determinadas por la expresión:

$$P_{cu} = R_{cc} I_1^2$$

Si el transformador trabaja a la mitad de la potencia nominal, la intensidad por el primario, en ese caso, será la mitad que la de plena carga y, por tanto, las pérdidas en el cobre también se verán reducidas:

$$I_1 = \frac{I_{1n}}{2} = \frac{10,4}{2} = 5,2 \text{ A} \quad P_{cu} = 36,9 \cdot 5,2^2 = 998 \text{ W}$$

18.6 Corriente de cortocircuito accidental

Cuando el secundario de un transformador se pone en cortocircuito por una avería, al estar el primario conectado a toda la tensión primaria, la corriente tiende a elevarse rápidamente a valores peligrosos para los conductores de ambos devanados (Figura 18.17).



Figura 18.17

Esta corriente, según el circuito equivalente en cortocircuito, quedará limitada exclusivamente por el valor de la impedancia de cortocircuito:

$$I_{cc} = \frac{V_{1n}}{Z_{cc}}$$

El valor de Z_{cc} no suele ser conocido. Sin embargo, el de u_{cc} suele aparecer en las placas de características, por lo que

si determinamos la relación que existe entre ambos parámetros podremos determinar con rapidez la intensidad de cortocircuito de un transformador:

En el ensayo de cortocircuito:

$$Z_{cc} = \frac{V_{cc}}{I_{1n}} \quad (1)$$

$$\text{Como } u_{cc} = \frac{V_{cc}}{V_{1n}} 100 \Rightarrow V_{1n} = \frac{V_{cc}}{u_{cc}} 100 \quad (2)$$

Si sustituimos las expresiones (1) y (2) en la primera ecuación, tendremos que:

$$I_{cc} = \frac{100 V_{cc} / u_{cc}}{V_{cc} / I_{1n}}, \text{ y simplificando}$$

$$I_{cc} = \frac{I_{1n}}{u_{cc}} \cdot 100$$

Ejemplo: 18.8

Determinar la intensidad de cortocircuito accidental del primario y del secundario del transformador del ejemplo 18.7.

Solución: Como la $u_{cc} = 4 \%$ y la $I_{1n} = 10,4 \text{ A}$, la intensidad de cortocircuito en el primario, es:

$$I_{cc1} = \frac{I_{1n}}{u_{cc}} 100 = \frac{10,4}{4} \cdot 100 = 260 \text{ A}$$

$$I_{cc2} = \frac{I_{2n}}{u_{cc}} 100 = \frac{628}{4} \cdot 100 = 15.700 \text{ A}$$

Se habrá podido observar que la corriente de cortocircuito es grande en transformadores con tensión de cortocircuito baja, y pequeña en transformadores con tensión de cortocircuito alta.

Una corriente de cortocircuito elevada puede provocar daños en los conductores si no se corta rápidamente, por lo que siempre es importante prestar atención a los dispositivos de protección elegidos para esta misión. Los daños a que nos referimos vienen causados por la elevación de temperatura en los bobinados por efecto Joule ($P_{cu} = R_{cc} I_{cc}^2$) y por los esfuerzos dinámicos que aparecen entre los conductores de una misma bobina, que pueden provocar deformaciones o roturas de las mismas cuando circulan grandes corrientes (los fuertes campos magnéticos creados por estos conductores desarrollan fuerzas de atracción y de repulsión que originan los esfuerzos dinámicos).

Una forma de reducir la corriente de cortocircuito accidental es aumentar la tensión de cortocircuito a costa de elevar la resistencia y la reactancia de cortocircuito. Esto trae consigo, como estudiaremos en el siguiente apartado, un aumento de la caída de tensión del transformador. Por esta razón, cuando se fabrican transformadores se busca un equilibrio entre estos valores.

18.7 Caída de tensión de un transformador

Dado que existen resistencias y reactancias intercaladas en serie con los bobinados del transformador, cuando circule una corriente de carga por los bobinados la tensión del secundario se verá reducida. La caída de tensión será entonces la diferencia algebraica entre la tensión del secundario en vacío (E_2) y la que aparece cuando el transformador trabaja en carga (V_2):

$$\Delta V = E_2 - V_2$$

Como veremos más adelante, es muy útil expresar esta caída en valores porcentuales referidos a la tensión de vacío, ya que así será posible relacionarla, con la ayuda del circuito equivalente con los parámetros de cortocircuito y con las tensiones de cortocircuito porcentuales. A este valor porcentual se le denomina *coeficiente de regulación* (ϵ).

$$\epsilon = \frac{E_2 - V_2}{E_2} \cdot 100$$

E_2 = Tensión del secundario en vacío

V_2 = Tensión del secundario en carga

ϵ = Coeficiente de regulación

Para determinar la relación antes mencionada nos valdremos del circuito equivalente con los parámetros de cortocircuito (Figura 18.18).

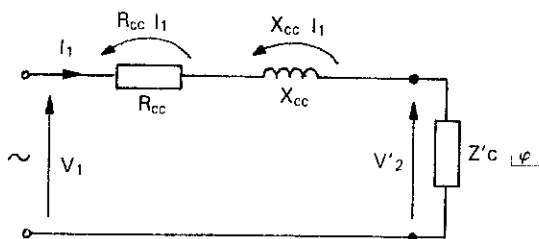


Figura 18.18. Circuito equivalente del transformador con parámetros de cortocircuito.

En este caso se supone que V_1 es la tensión que aparecería en la carga reducida al primario estando el transformador en vacío. La tensión V_2 sería la tensión que aparece en bornes de la carga cuando se establece la corriente I_1 por el transformador. En este caso la caída de tensión será la diferencia entre estas dos tensiones:

$$\Delta V = V_1 - V_2'$$

y que coincide con bastante aproximación con la caída de tensión expresada con anterioridad.

El coeficiente de regulación en este caso se expresará de la forma:

$$\epsilon = \frac{V_1 - V_2'}{V_1} \cdot 100$$

Para calcular el coeficiente de regulación nos valdremos del diagrama vectorial de la Figura 18.19, donde expresaremos la siguiente ecuación:

$$V_1 = V_2' + R_{cc} I_1 + X_{cc} I_1$$

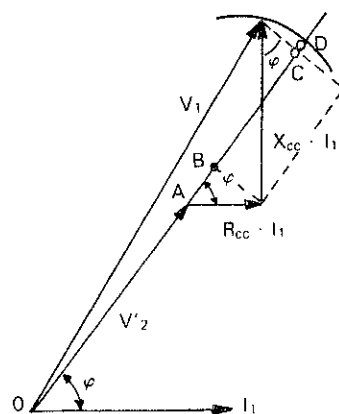


Figura 18.19. Diagrama vectorial para determinar la caída de tensión.

El coeficiente de regulación será:

$$\epsilon = \frac{V_1 - V_2'}{V_1} \cdot 100 = \frac{OD - OA}{V_1} \cdot 100 =$$

$$\frac{AD}{V_1} \cdot 100 = \frac{AC}{V_1} \cdot 100 = \frac{AB + BC}{V_1} \cdot 100$$

Sustituyendo estos términos por los relacionados con las caídas de tensión óhmica e inductiva en el diagrama vectorial:

$$\epsilon = \frac{R_{cc} I_1 \cos \varphi + X_{cc} I_1 \sen \varphi}{V_1} \cdot 100$$

Como $u_{R_{cc}} = \frac{R_{cc} I_1}{V_1} \cdot 100$ y $u_{X_{cc}} = \frac{X_{cc} I_1}{V_1} \cdot 100$,

tenemos que:

$$\epsilon = u_{R_{cc}} \cos \varphi + u_{X_{cc}} \sen \varphi$$

ε = coeficiente de regulación

$u_{R_{cc}}$ = caída de tensión óhmica de cortocircuito

$u_{X_{cc}}$ = caída de tensión inductiva de cortocircuito

$\cos \varphi$ = factor de potencia de la carga

Ejemplo: 18.9

Se desea determinar el valor efectivo de la tensión de salida de un transformador monofásico a plena carga con un FP de 0,85. Las características del mismo son: 10 KVA; 1000/398 V; $u_{R_{cc}} = 3,2\%$; $u_{X_{cc}} = 2,4\%$. Averiguar también el valor efectivo de la tensión en la carga cuando el transformador trabaje a la mitad de su potencia nominal y a un FP de 0,85 inductivo de la misma.

Solución: Con los datos aportados de las caídas de tensión porcentuales y el factor de potencia de la carga calculamos el coeficiente de regulación del transformador.

$$\varepsilon = u_{R_{cc}} \cos \varphi + u_{X_{cc}} \sin \varphi = 3,2 \cdot 0,85 + 2,4 \cdot 0,53 = 4\%$$

Este dato nos indica que el transformador produce una caída del 4% de la tensión de salida para la corriente nominal, es decir:

$$\Delta V = \frac{398 \text{ V}}{100} \cdot 4\% = 15,9 \text{ V}$$

La tensión en bornes del secundario para esta carga será, entonces:

$$V_2 = E_2 - \Delta V = 398 - 15,9 = 382 \text{ V}$$

Cuando el transformador trabaje a la mitad de la carga, la intensidad por el primario será también la mitad. Se puede comprobar que la caída de tensión que se produce también será la mitad ($V_{cc} = Z_{cc} I_{1n}/2$), por lo tanto las componentes $u_{R_{cc}}$, $u_{X_{cc}}$ serán también la mitad. En definitiva el coeficiente de regulación también se ve reducido en la misma manera.

Por lo tanto, si llamamos (C) al índice de carga, expresado como la relación entre la corriente a cualquier carga y la carga a la potencia nominal: $C = I_1/I_{1n}$, tendremos que:

$$\varepsilon_C = C\varepsilon$$

En nuestro caso $C = 1/2$, por lo que $\varepsilon = 0,5 \cdot 4 = 2\%$

La caída de tensión es ahora:

$$V = \frac{398 \text{ V}}{100} \cdot 2\% = 7,96 \text{ V}$$

La tensión en bornes del secundario para esta carga, es:

$$V_2 = E_2 - \Delta V = 398 - 7,96 = 390 \text{ V}$$

Ejemplo: 18.10

Se desea determinar el valor efectivo de la tensión de salida de un transformador monofásico a plena carga con un FP de 0,85. Las características del mismo son 50 KVA y 1.000/230 V. En el ensayo de cortocircuito se han obtenido los siguientes resultados: ha consumido 90 W al aplicar una tensión de 10 V y circula una corriente por el primario de 12,5 A. Averiguar también: a) las pérdidas en el cobre a plena carga; b) el valor efectivo de la tensión en la carga cuando el transformador trabaje a la mitad de su potencia nominal y a un FP de 0,85 inductivo de la misma.

Solución: Lo primero que vamos a hacer es comprobar si el ensayo en cortocircuito se ha hecho para la corriente nominal:

$$I_{1n} = \frac{S_n}{V_{1n}} = \frac{50.000}{1.000} = 50 \text{ A}$$

Este resultado nos indica que el ensayo se ha hecho a corriente reducida. Esto se hace con el fin de que la fuente de tensión regulable y los aparatos sean más sencillos. Por otro lado, los valores de la impedancia y el factor de potencia de cortocircuito permanecen fijos para cualquier corriente de ensayo, por lo que:

$$Z_{cc} = \frac{V'_{cc}}{I'_{cc}} = \frac{10}{12,5} = 0,8 \Omega$$

$$\cos \varphi_{cc} = \frac{P'_{cc}}{V'_{cc} I'_{cc}} = \frac{90}{10 \cdot 12,5} = 0,72 \Rightarrow \varphi_{cc} = 43,94^\circ$$

$$R_{cc} = Z_{cc} \cos \varphi_{cc} = 0,8 \cdot 0,72 = 0,58 \Omega$$

a) Las pérdidas del cobre a la potencia nominal serán entonces:

$$P_{cu} = R_{cc} I_{1n}^2 = 0,58 \cdot 50^2 = 1.450 \text{ W}$$

La tensión de cortocircuito para la intensidad nominal se calculará aplicando la ley de Ohm a la impedancia de cortocircuito:

$$V_{cc} = Z_{cc} I_{1n} = 0,8 \cdot 50 = 40 \text{ V}$$

$$u_{cc} = \frac{V_{cc}}{V_{1n}} \cdot 100 = \frac{40}{1.000} \cdot 100 = 4\%$$

$$u_{R_{cc}} = u_{cc} \cos \varphi_{cc} = 4 \cdot 0,72 = 2,88\%$$

$$u_{X_{cc}} = u_{cc} \sin \varphi_{cc} = 4 \cdot \sin 43,94^\circ = 2,77\%$$

Ahora ya podemos determinar el coeficiente de regulación:

$$\varepsilon = u_{R_{cc}} \cos \varphi + u_{X_{cc}} \sin \varphi = 2,88 \cdot 0,85 + 2,77 \cdot 0,53 = 3,9\%$$

La tensión en bornes V_2 de la carga la obtenemos a partir de este coeficiente y de la tensión de vacío E_2 :

$$V_2 = E_2 - \frac{E_2 \varepsilon}{100} = 230 - \frac{230 \cdot 3,8}{100} = 221 \text{ V}$$

b) Cuando el transformador trabaja a la mitad de la carga, la intensidad por el primario es también la mitad. Se puede comprobar que la caída de tensión que se produce también es la mitad ($V_{cc} = Z_{cc} I_{1n}/2$), por tanto las componentes u_{Rcc} , u_{Xcc} serán también la mitad. En definitiva el coeficiente de regulación también se ve reducido de la misma manera.

Por lo tanto, si llamamos (C) al índice de carga, expresado como la relación entre la corriente a cualquier carga y la carga a la potencia nominal: $C = I_1/I_{1n}$, tendremos que:

$$\varepsilon_C = C \varepsilon$$

En nuestro caso $C = 1/2$, por lo que $\varepsilon = 0,5 \cdot 3,9 = 1,95\%$

La tensión en bornes de la carga será entonces:

$$V_2 = \dots = 225,5 \text{ V}$$

¿Qué ocurre cuando se conecta una carga capacitiva a un transformador?: Al invertirse el ángulo φ de la carga, para ciertos valores se puede comprobar que la caída se puede convertir en nula e incluso hacerse negativa. Es decir, con cargas capacitivas puede aparecer una tensión más alta en bornes de la carga que en vacío.

Ejemplo: 18.11

Determinar la tensión en bornes de la carga del transformador del Ejemplo 18.10, trabajando a plena carga y con un factor de potencia capacitivo de 0,1.

Solución: Para un $\cos \varphi = 0,1$ capacitivo le corresponde un ángulo igual a:

$$\varphi = \arccos 0,1 = -84,3^\circ \text{ (es negativo por que la tensión queda retrasada respecto a la intensidad)}$$

$$\text{sen } \varphi = \text{sen } (-84,3^\circ) = -0,99$$

$$\varepsilon = u_{Rcc} \cos \varphi + u_{Xcc} \text{sen } \varphi = 2,88 \cdot 0,1 + 2,77 \cdot (-0,99) = -2,45\%$$

$$V_2 = E_2 - \frac{E_2 \varepsilon}{100} = 230 - \frac{230 \cdot (-2,44)}{100} = 235,6 \text{ V}$$

En este caso la tensión del secundario en carga es mayor que la de vacío.

Mediante el diagrama vectorial de la Figura 18.19 se puede hacer un estudio de cómo se comporta el transformador para una corriente de salida fija y un factor de potencia variable (cargas óhmicas, cargas inductivas y cargas capacitivas).

A este tipo de gráficos se les conoce por el nombre de diagrama de Kapp, en el que se puede determinar la caída de tensión para cualquier tipo de carga.

Por todo esto se puede concluir que la tensión que aparece en bornes de un transformador depende de la potencia que suministre por el secundario a la carga, así como del factor de potencia de la misma.

Para transformadores que posean una potencia nominal inferior a 16 KVA se indica en su placa de características el valor de la tensión de salida a plena carga, suponiendo un factor de potencia igual a la unidad.

En los transformadores con potencias superiores a 16 KVA se indica en la placa de características la tensión de cortocircuito en valores porcentuales. Además, se suele añadir un conmutador de tensiones, cuya misión es compensar las caídas de tensión producidas en el transformador o en la propia línea de distribución. Este conmutador posee varias posiciones y es capaz de seleccionar, de una forma automática, más o menos espiras de uno de los bobinados, consiguiendo así seleccionar la tensión de salida al valor deseado.

En la Figura 18.20 se muestran diferentes curvas características de un transformador para la tensión en bornes de la carga en función de la corriente de la misma. Se han trazado varias curvas para poder apreciar la diferencia en las mismas para diferentes tipos de carga.

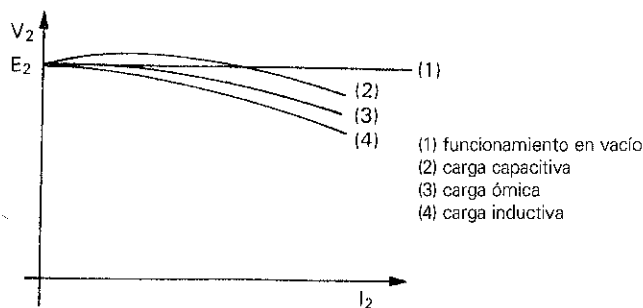


Figura 18.20. Curvas características de un transformador. $V_2 = f(I_2)$.

18.8 Rendimiento de un transformador

Un transformador ideal no produce ningún tipo de pérdidas y, por eso, la potencia que absorbe por el primario de la red la entrega íntegramente por el secundario a la carga. En un transformador real esto no ocurre exactamente así, ya que la potencia absorbida por el primario queda aumentada por efecto de las pérdidas en el hierro y en el cobre. Aun así, el transformador es una máquina eléctrica que posee un alto rendimiento (por encima del 90%).

Se puede decir que el rendimiento de un transformador es la relación entre la potencia suministrada a la carga por el secundario (P_2) y la potencia absorbida de la red por el primario (P_1), expresada en tantos por ciento. De esta forma, el rendimiento vendrá dado por la siguiente expresión:

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} 100$$

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 y en los devanados de cobre: $P_1 = P_2 + P_{Fe} + P_{Cu}$

$$\eta = \frac{P_2}{P_2 + P_{Fe} + P_{Cu}} 100$$

η = rendimiento del transformador en %

P_2 = potencia activa cedida a la carga

P_{Fe} = pérdidas en el hierro

P_{Cu} = pérdidas en el cobre

El rendimiento del transformador dependerá del índice de carga al que trabaje. Se demuestra matemáticamente que se alcanza el rendimiento máximo para un índice de carga tal que las pérdidas en el cobre sean igual que las del hierro.

Ejemplo: 18.12

Un transformador monofásico posee las siguientes características: 10 KVA, 7.200/398 V, potencia de ensayo en vacío = 125 W, potencia de ensayo en cortocircuito = 360 W. Determinar: a) el rendimiento a plena carga y $\cos\phi = 0,8$; b) el rendimiento cuando el transformador trabaje a la mitad de su potencia nominal y $\cos\phi = 0,8$; c) la potencia a que debe trabajar el transformador para que lo haga con el rendimiento máximo.

Solución: a) Para calcular el rendimiento a plena carga habrá que determinar previamente la potencia activa con el factor de potencia indicado ($P_2 = S \cos\phi$):

$$\eta = \frac{S \cos\phi}{S \cos\phi + P_{Fe} + P_{Cu}} 100 = \frac{10.000 \cdot 0,8}{10.000 \cdot 0,8 + 125 + 360} \cdot 100 = 94,28\%$$

b) Cuando el transformador trabaje a la mitad de la carga se reducirán también las pérdidas en el cobre, manteniéndose constantes las del hierro.

Las pérdidas en el cobre para cualquier carga I_1 son:

$$P_{Cu} = R_{cc} I_1^2, \text{ como el índice de carga es:}$$

$$C = \frac{I_1}{I_{1n}} \Rightarrow$$

$I_1 = C I_{1n}$ sustituyendo en la primera ecuación:

$$P_{Cu} = R_{cc} I_{1n}^2 C^2$$

Como el término $R_{cc} I_{1n}^2$ coincide con las pérdidas del ensayo en cortocircuito a intensidad nominal:

$$P_{Cu} = R_{cc} C^2$$

$P_{Cu (C=1/2)} = 360 \cdot (1/2)^2 = 90$ W, el rendimiento será entonces:

$$\eta_C = \frac{C S_n \cos\phi}{C S_n \cos\phi + P_{Fe} + C^2 P_{cc}} 100 \Rightarrow$$

$$\eta_{(C=1/2)} = \frac{1/2 \cdot 10.000 \cdot 0,8}{1/2 \cdot 10.000 \cdot 0,8 + 125 + 90} \cdot 100 = 94,9\%$$

c) El rendimiento máximo se consigue cuando se cumple: $P_{Fe} = P_{Cu}$

$$P_{Fe} = P_{cc} C^2 \Rightarrow C = \sqrt{\frac{P_{Fe}}{P_{cc}}} = \sqrt{\frac{125}{360}} = 0,59$$

Lo que nos indica que el transformador consigue su rendimiento máximo cuando trabaja a un 59% de su potencia nominal. Para un factor de potencia de la carga igual a la unidad, este rendimiento será:

$$\eta_{m\acute{a}x} = \frac{0,59 \cdot 10.000 \cdot 0,8}{0,59 \cdot 10.000 \cdot 0,8 + 125 + 125} \cdot 100 = 94,97\%$$

18.9 Características nominales de un transformador

La potencia nominal de un transformador monofásico es el producto de su tensión nominal primaria por la corriente nominal primaria. Es decir, su potencia aparente:

$$S_n = V_n I_n$$

Se entiende por tensiones y corrientes nominales a los valores para los cuales ha sido proyectado el transformador. Así, por ejemplo, un transformador que posea las siguientes características nominales:

- Tensión nominal del primario: 10.000 V
- Corriente nominal del primario: 50 A

le corresponderá una potencia nominal de:

$$S_n = V_n I_n = 10.000 \cdot 50 = 500.000 \text{ VA} = 500 \text{ KVA}$$

Los aislantes del bobinado primario de este transformador deberán soportar una tensión superior a 10.000 V, y los conductores del mismo deberán poseer una sección suficiente para soportar el paso de una corriente de 50 A.

En resumen, se puede decir que la potencia nominal de un transformador es un valor puramente convencional de referen-

cia y que esta fijado, básicamente, desde un punto de vista térmico. Hay que pensar que el transformador trabajando a plena carga se calienta por causa de las pérdidas en el cobre ocasionadas por el efecto Joule en los conductores del primario y del secundario, así como por las pérdidas que aparecen en el núcleo de hierro por histéresis y corrientes parásitas.

Un transformador trabajando a sus características nominales evacuará el calor que produce sin dificultad, manteniendo una temperatura de trabajo no peligrosa.

¿Cómo podemos aumentar la potencia nominal de un transformador?

Cuando nosotros exigimos a un transformador que trabaje a una potencia superior a la nominal, éste se calienta excesivamente. Si nosotros refrigeramos el transformador, por ejemplo con un ventilador o sumergiendo los bobinados en aceite mineral, habremos conseguido el objetivo propuesto.

18.10 Autotransformadores

Estos dispositivos se construyen con el mismo núcleo que los transformadores pero con un sólo devanado y una conexión intermedia (Figura 18.21). Al conjunto de las espiras se le somete a la tensión mayor (V_1), pudiendo ser considerado éste como el primario. Al estar la toma intermedia conectada a menos espiras, aparece en ella una tensión menor (V_2), que corresponde a la del secundario. La relación de transformación vendrá dada en este caso por:

$$m = \frac{V_1}{V_2} = \frac{N_1}{N_2}$$

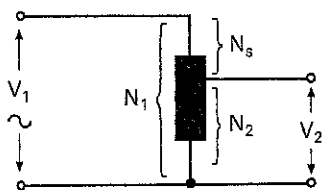


Figura 18.21. Autotransformador.

En los autotransformadores, el devanado primario está eléctricamente unido con el de salida; esto propicia que parte de la energía del primario se transfiera directamente hacia el secundario a través de los propios conductores de los devanados; el resto de la energía se transmite por inducción magnética como en un transformador normal.

Si I_1 es la intensidad del primario e I_2 la del secundario, la intensidad que circulará por el devanado común (N_3) en un transformador reductor será igual a la diferencia de las mismas ($I_c = I_1 - I_2$) (Figura 18.22). Esto hace que se pueda reducir la sección de los conductores, con el consiguiente ahorro de cobre. Además el núcleo podrá ser más pequeño, por lo que las pérdidas en el cobre y en el hierro serán más reducidas.

Una vez entendido esto, comprenderemos que las principales ventajas que presentan los autotransformadores son: abaratamiento, reducción de peso y volumen, y mejor rendimiento. Sin embargo, su uso se ve limitado por no aislar eléctricamente

el bobinado de alta tensión con el de baja, lo que puede provocar en caso de avería (por ejemplo, si se corta el devanado común) que la tensión del primario aparezca íntegramente en secundario, con el consiguiente peligro que ello conlleva. Por eso sólo podrá aplicarse en aquellos casos en que la tensión superior no exceda el 25% de la inferior.

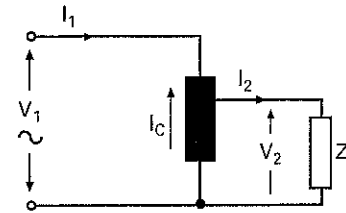


Figura 18.22. Autotransformador en carga.

18.11 Autotransformadores de regulación

Estos dispositivos son como los que hemos empleado para realizar los ensayos de cortocircuito de los transformadores.

Los autotransformadores son ideales para obtener una tensión variable mediante un sistema que sea capaz de ir poniendo en conexión las diferentes espiras del bobinado principal. Se construyen con contactos deslizantes o con contactos fijos seleccionados mediante un conmutador múltiple rotativo (Figura 18.23).

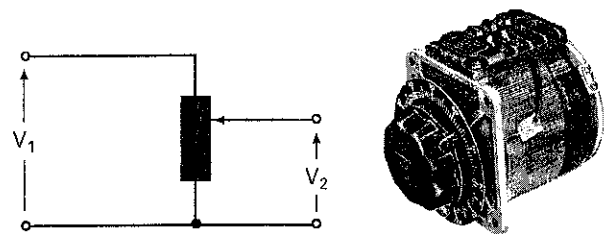


Figura 18.23. Autotransformador de regulación.

18.12 Transformadores Trifásicos

El transformador trifásico es el de más extensa aplicación en los sistemas de transporte y distribución de energía eléctrica. Dado que los niveles de energía que se manejan en estos casos es elevada, este tipo de transformadores se construyen para potencias nominales también elevadas.

Se puede decir que un transformador trifásico está constituido por tres transformadores monofásicos montados en un núcleo magnético común. Los principios teóricos que se han expuesto para los sistemas monofásicos son totalmente aplicables a los trifásicos, teniendo en cuenta que ahora se aplicarán a cada una de las fases de los mismos.

Para su construcción se emplea un núcleo de chapas magnéticas de grano orientado con tres columnas alineadas, tal como se muestra en la Figura 18.24. En cada una de estas columnas se arrollan los respectivos bobinados primarios y secundarios de cada una de las fases.

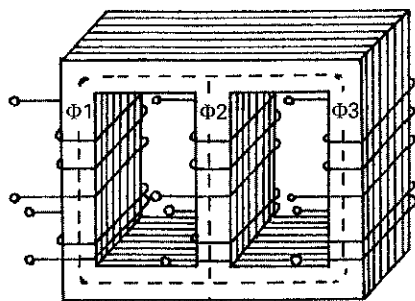


Figura 18.24. Circuitos magnéticos y eléctricos de un transformador trifásico.

Dado que el circuito magnético no es del todo simétrico, la corriente de vacío de la columna central es un poco más pequeña que la de las otras dos. Esto no afecta significativamente al funcionamiento del transformador.

Al igual que se hacía con los transformadores monofásicos, para evitar en lo posible los flujos de dispersión, se coloca en cada columna los bobinados de baja y alta tensión de cada una de las fases, bobinando primero, y sobre el núcleo el bobinado de baja tensión y encima de éste el de alta tensión. En la Figura 18.25 se muestra el aspecto de un transformador trifásico.

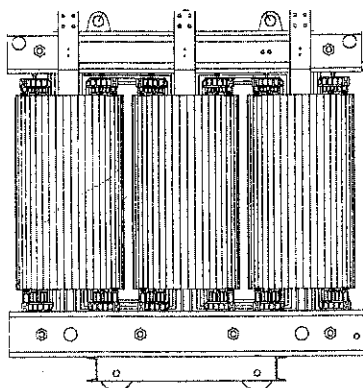


Figura 18.25. Transformador trifásico.

También es posible la elaboración de un transformador trifásico a partir de tres monofásicos, constituyendo lo que se conoce como **banco de tres transformadores monofásicos**.

Se constituye a partir de tres transformadores monofásicos de las mismas características eléctricas. Con las tres bobinas primarias conectadas en estrella o en triángulo, se forma el primario trifásico y con las tres secundarias monofásicas, conectadas también en estrella o triángulo, el secundario trifásico (Figura 18.26).

El banco de transformadores monofásicos presenta alguna ventaja frente a los trifásicos, pero su mayor precio y peor rendimiento hace que sean utilizados en aplicaciones muy especiales. Las ventajas que poseen frente a los trifásicos son las siguientes: a) para potencias muy elevadas es más fácil su transporte por carretera; b) en caso de avería siempre hay que disponer de un transformador trifásico de reserva; en un banco es suficiente disponer de un monofásico de reserva, lo que abarata su costo y facilita la reparación de la fase estropeada.

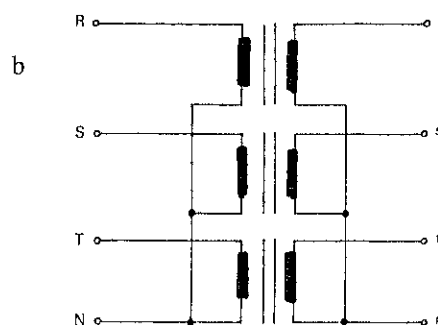
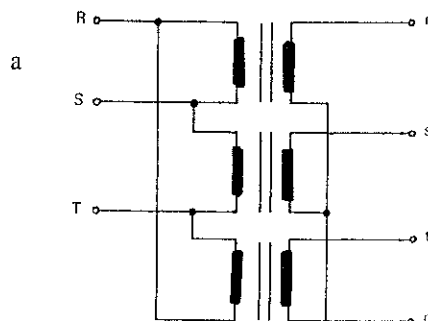


Figura 18.26. Banco de tres transformadores monofásicos: a) conexión triángulo-estrella; b) conexión estrella-estrella.

18.12.1 Conexiones de los transformadores trifásicos

Los bobinados de alta tensión de un transformador trifásico se pueden conectar en estrella (Y) o en triángulo (D). Por otro lado, los bobinados de baja tensión se pueden conectar también en estrella (y) o en triángulo (d).

En la Figura 18.27 se muestra la denominación habitual de los terminales de los diferentes devanados de un transformador trifásico. Las letras mayúsculas U, V, W representan los principios de los devanados de alta tensión y X, Y, Z los finales de los mismos. Para baja tensión se emplea la misma nomenclatura con letras minúsculas.

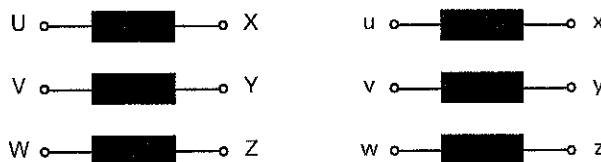


Figura 18.27. Denominación de terminales en un transformador trifásico.

En estrella se consigue que la tensión a la que queda sometida cada fase del transformador sea $\sqrt{3}$ veces menor que la tensión de línea, por lo que se consigue reducir el número de espiras en relación a la conexión en triángulo para una misma relación de transformación de tensiones compuestas. Por otro lado, la conexión en estrella hace circular una corriente por cada fase del transformador $\sqrt{3}$ veces mayor que en la conexión en triángulo, por lo que la sección de los conductores de

las espiras aumenta en relación a la conexión en triángulo. Conectando el secundario en estrella se consigue disponer de neutro, lo que permite obtener dos tensiones de distribución y la posibilidad de conectar el neutro a tierra para garantizar la seguridad de las instalaciones.

A continuación se muestran los esquemas típicos de conexión de los transformadores trifásicos. En la Figura 18.28 a se muestra una conexión estrella estrella (Yy), en la Figura 18.28 b una conexión estrella triángulo (Yd), y en la figura 18.28 c triángulo estrella (Dy).

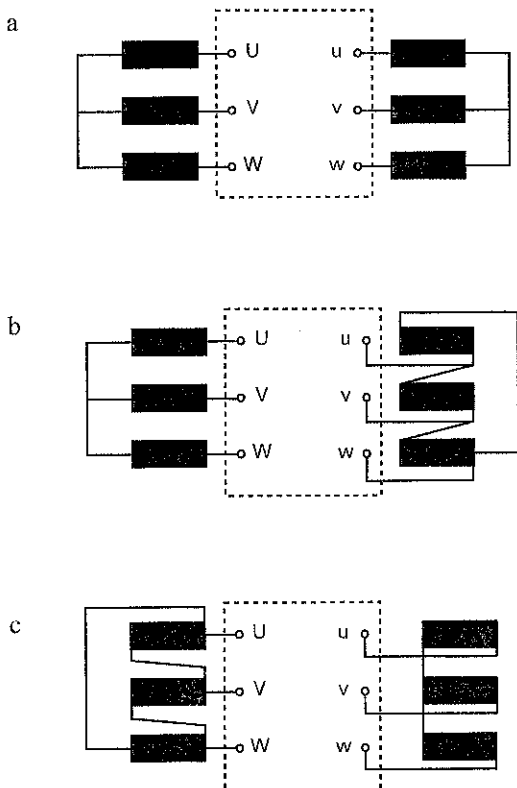


Figura 18.28. Conexiones del transformador trifásico: a) Yy; b) Dy; c) Yd.

Cuando se conecta el primario y el secundario en estrella (Yy), por ejemplo, un transformador de distribución a dos tensiones que posea alta tensión en el primario, y se conectan cargas en el secundario fuertemente desequilibradas, aparece un fuerte desequilibrio de corrientes en el primario que, a su vez, provoca una asimetría de los flujos que hace que la tensión de salida aumente en las fases no cargadas y disminuya en las cargadas. Este fenómeno se reduce considerablemente si conectamos el primario en triángulo (Dy), pero eliminamos la posibilidad de conectar el neutro en el lado de alta tensión.

Una forma de evitar este fenómeno manteniendo el neutro consiste en conectar el secundario en zig-zag (Yz), para lo cual se divide el bobinado de cada fase en dos partes iguales y se arrollan en sentido contrario y cada parte se conecta en serie con la columna consecutiva, tal como se muestra en la Figura 18.29. La conexión en zig-zag resulta un poco más costosa por requerir un número de espiras mayor en el secundario respecto a una conexión en estrella.

En la práctica se emplea la conexión Dy para grandes transformadores y la conexión Yz se utiliza para pequeños transformadores en la red de baja tensión.

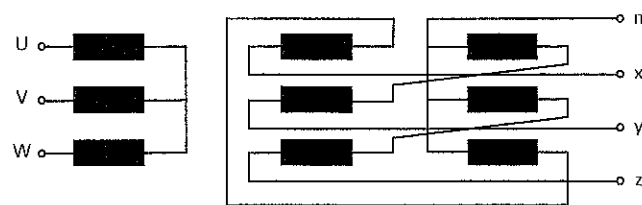


Figura 18.29. Transformador con el secundario en zig-zag (Yz).

18.12.2 Desfase entre el primario y el secundario de transformadores trifásicos

Cuando se conecta el primario y el secundario de la misma forma, por ejemplo, Yy o Dd, el ángulo de desfase entre el lado de alta tensión y el de baja puede ser 0° (en fase) o 180° (oposición de fase) según la posición de salida de los terminales. En el caso de que el primario y el secundario se conecten de diferente forma, por ejemplo, Dy, Yd, Yz, el desfase entre ambos bobinados podrá ser 150° o 180° .

Normalmente se expresan estos resultados en forma horaria, de tal forma que la tensión primaria represente los minutos (siempre en las 12) y la secundaria las horas. Dado que la esfera de un reloj está dividida en 12 horas, cada hora equivale a $360^\circ/12 = 30^\circ$. De esta forma, si un transformador presenta un desfase de 150° , el desfase representado en forma horaria será $150^\circ/30^\circ = 5$ horas (véase Figura 18.30). Así, por ejemplo, un transformador con el lado de alta tensión conectado en estrella y el de baja en triángulo para un desfase de 150° obtendríamos un grupo de conexión Yd5 y para un desfase de 330° un grupo de conexión Yd11.

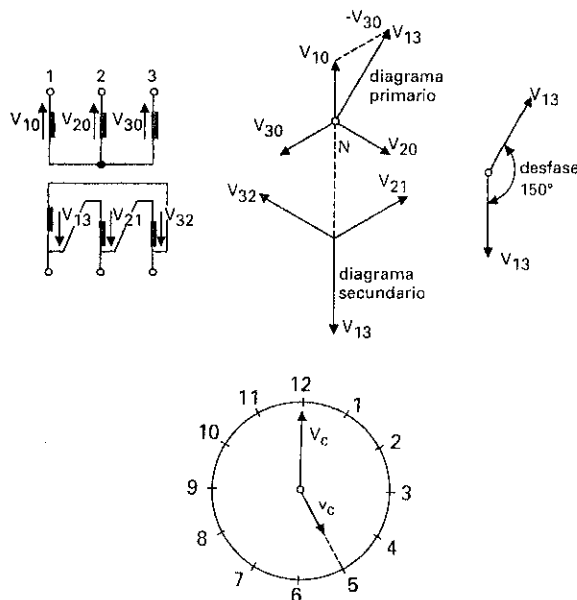


Figura 18.30. Representación horaria del desfase de un transformador en conexión Yd.

Seguidamente se indican los grupos de conexión más comunes:

Dd0, Yy0, Dz0, Dd6, Yy6, Dz6, Dy5, Yd5, Yz5, Dy11, Yd11, Yz11.

Los grupos de conexiones se indican en la placa de características de los transformadores.

18.12.3 Ensayo en vacío de un transformador trifásico

Este ensayo se lleva a cabo de la misma forma que para transformadores monofásicos. En la Figura 18.31 se muestra el esquema eléctrico del ensayo de un transformador conectado en estrella-estrella con los aparatos de medida utilizados. Para la medida de potencia se han empleado tres vatímetros con el fin de captar la diferencia que pudiera haber en cada fase. La suma de las lecturas de los tres vatímetros nos dará las pérdidas en el hierro del transformador.

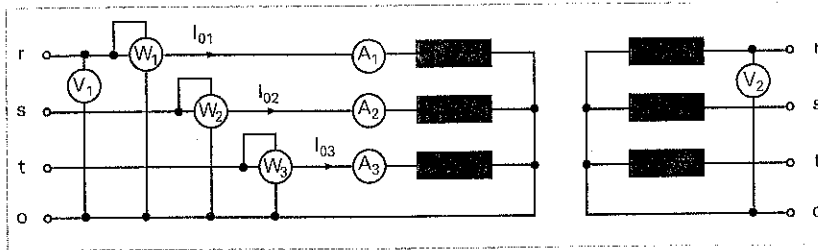


Figura 18.31. Esquema de conexiones para realizar el ensayo en vacío de un transformador trifásico.

$$P_{Fe} = W_1 + W_2 + W_3$$

Para calcular la relación de transformación del transformador aplicaremos la relación:

$$m_s = \frac{N_1}{N_2} = \frac{V_1}{V_2}$$

(relación de transformación simple o por fase)

Si conectamos los voltímetros entre las fases del primario y del secundario obtendríamos la relación de transformación compuesta $m_c = V_{C1}/V_{C2}$. Cuando ambos devanados se conectan de la misma forma, la relación de transformación simple se hace igual a la compuesta. Pero cuando las conexiones son diferentes éstas no coinciden. Por otro lado, a efectos prácticos, el dato que más nos interesa conocer de un transformador es su relación de transformación compuesta.

Ejemplo: 18.13

Al someter a un ensayo en vacío a un transformador trifásico de 250 KVA, 12.000/398 V, conectado en estrella-estrella y según el esquema de la Figura 18.31, se han obtenido los siguientes resultados: $I_0 = 0,5$ A; $P_0 = 1.000$ W; V_{1s}

$= 6.928$ V; $V_{2s} = 230$ V. Determinar: a) las pérdidas en el hierro; b) la corriente de vacío; c) la relación de transformación simple.

Solución: a) Las pérdidas en el hierro coinciden con las obtenidas por los tres vatímetros en el ensayo: $P_{Fe} = 1.000$ W.

b) La corriente de vacío es la indicada por los amperímetros en el ensayo: $I_0 = 0,5$ A.

c) La relación de transformación simple la obtenemos con las lecturas de los voltímetros conectados entre la fase y neutro:

$$m = \frac{V_{1s}}{V_{2s}} = \frac{6.928}{230} = 30,12$$

18.12.4 Ensayo en cortocircuito de un transformador trifásico

Al igual que se hacía para los monofásicos, se cortocircuita el secundario y, mediante una fuente de C.A. alterna regulable, se hace que circule por el primario la intensidad nominal. En el esquema de la Figura 18.32 el voltímetro nos indica la tensión de cortocircuito, siempre y cuando esté conectado a una de las fases del transformador (para conexión en estrella \Rightarrow entre fase y neutro; para conexión en triángulo \Rightarrow entre fases).

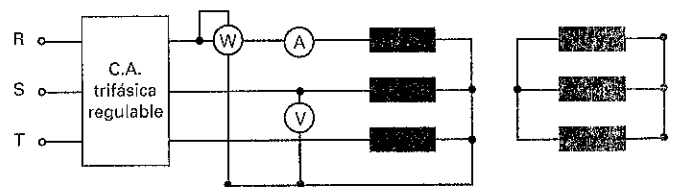


Figura 18.32. Esquema de conexiones para realizar el ensayo en cortocircuito de un transformador.

Como el sistema es equilibrado, podremos utilizar cualquiera de los métodos conocidos para medir la potencia trifásica en cortocircuito, que coincidirá con las pérdidas en el cobre. En el ensayo de la Figura 18.32 se ha utilizado el método de un vatímetro para medir dicha potencia ($P_{Cu} = 3$ W) en un transformador trifásico en conexión estrella-estrella.

Ejemplo: 18.14

Al someter a un ensayo en cortocircuito a un transformador trifásico de 250 KVA, 12.000/398 V, conectado en triángulo-estrella, se ha medido una tensión de cortocircuito entre fases de 600 V y una potencia total de 4.000 W cuando circulaba la intensidad nominal por el primario. Averiguar: a) las pérdidas en el cobre y el factor de potencia de cortocircuito; b) la tensión porcentual de cortocircuito y sus componentes; c) tensión compuesta en la carga cuando el

transformador trabaje a plena carga y con un factor de potencia inductivo de 0,85; d) rendimiento del transformador en estas condiciones si las pérdidas en el hierro son de 675 W; e) la intensidad de cortocircuito accidental por las fases del primario, así como por la línea del mismo. Calcular también la intensidad de cortocircuito del secundario.

Solución: a) Como el ensayo se ha hecho para la corriente nominal, las pérdidas en el cobre coincidirán con la potencia de cortocircuito medida en el ensayo:

$$P_{Cu} = P_{cc} = 4.000 \text{ W}$$

El factor de potencia lo determinamos a partir de las lecturas de los diferentes aparatos de medida. Primero calcularemos la intensidad de línea nominal primaria:

$$I_{1L} \frac{S_n}{\sqrt{3} V_{1C}} = \frac{250.000}{\sqrt{3} \cdot 12.000} = 12 \text{ A}$$

$$\cos \varphi_{cc} = \frac{P_{cc}}{\sqrt{3} V_{cc} I_{1L}} = \frac{4.000}{\sqrt{3} \cdot 600 \cdot 12} = 0,32 \Rightarrow \varphi_{cc} = 71,34^\circ$$

b) La tensión de cortocircuito porcentual de cada una de las fases se determina a través de la tensión de cortocircuito medida en una de las fases; al estar en triángulo, la tensión entre fases medida coincide con dicha tensión.

$$u_{cc} = \frac{V_{cc}}{V_{1c}} \cdot 100 = \frac{600}{12.000} \cdot 100 = 5\%$$

$$u_{Rcc} = u_{cc} \cos \varphi_{cc} = 5 \cdot 0,32 = 1,6\%$$

$$u_{Xcc} = u_{cc} \sin \varphi_{cc} = 5 \cdot \sin 71,34^\circ = 4,73\%$$

c) Para determinar la tensión en la carga habrá que determinar previamente el coeficiente de regulación correspondiente:

$$\varepsilon = u_{Rcc} \cos \varphi + u_{Xcc} \sin \varphi = 1,6 \cdot 0,85 + 4,73 \cdot 0,53 = 3,87\%$$

Por lo que la caída de tensión que se producirá será de:

$$\Delta V = \frac{E_2}{100} \varepsilon = \frac{398}{100} \cdot 3,87\% = 15,4 \text{ V}$$

La tensión que se presenta en la carga, es:

$$V_2 = E_2 - \Delta V = 398 - 15,4 = 382,6 \text{ V}$$

d) El rendimiento lo calculamos mediante la expresión:

$$\eta = \frac{P_2}{P_2 + P_{Fe} + P_{Cu}} \cdot 100 = \frac{S \cos \varphi}{S \cos \varphi + P_{Fe} + P_{Cu}} \cdot 100$$

$$\eta = \frac{250.000 \cdot 0,85}{250.000 \cdot 0,85 + 675 + 4.000} \cdot 100 = 97,8\%$$

e) La intensidad de cortocircuito accidental por fase del primario lo determinamos con la expresión ya conocida:

$$I_{cc(f)} = \frac{100}{u_{cc}} I_{1n(f)}$$

Para lo cual determinamos primero la intensidad por la fase del primario del transformador conectado en triángulo:

$$I_{1n(f)} = I_{1L} / \sqrt{3} = 12 / \sqrt{3} = 6,93 \text{ A}$$

$$I_{cc1(f)} = \frac{100}{5} \cdot 6,93 = 138,6 \text{ A}$$

En la línea aparecerá una intensidad de cortocircuito igual a:

$$I_{cc1(L)} = \sqrt{3} I_{cc(f)} = \sqrt{3} \cdot 138,6 = 240 \text{ A}$$

Para calcular la corriente de cortocircuito del secundario primero calculamos la intensidad nominal por el mismo. En el secundario aparecerá una corriente de cortocircuito igual a:

$$I_{2L} \frac{S_n}{\sqrt{3} V_{2C}} = \frac{250.000}{\sqrt{3} \cdot 398} = 363 \text{ A}$$

$$I_{cc2(f)} = \frac{100}{5} \cdot 363 = 7.260 \text{ A}$$

18.13 Conexión en paralelo de transformadores

En ciertas ocasiones es necesario acoplar transformadores en paralelo para conseguir así aumentar la potencia de salida. Para hacerlo, se deberán cumplir las siguientes condiciones:

a) Los valores instantáneos de las tensiones de salida deben ser iguales, por lo que siempre habrá que conectar los transformadores con el mismo orden de fases en la salida. Además el desfase correspondiente al grupo de conexión de ambos transformadores debe ser el mismo.

Una forma de comprobar este último extremo consiste en verificar con un voltímetro si existe diferencia de potencial entre cada uno de los terminales de salida a conectar, tal como se muestra en la Figura 18.33.

b) El reparto de potencia de cada uno de los transformadores dependerá de la impedancia de cortocircuito que posea cada uno de ellos, de tal forma que suministrará más potencia el que tenga menor impedancia. Normalmente se conoce la tensión de cortocircuito u_{cc} , que es proporcional a dicha impe-

dancia, por lo que hay que procurar conectar transformadores que posean la misma potencia nominal y la misma tensión de cortocircuito. En el caso de que las potencias nominales de los transformadores sean diferentes, éstas no deben diferenciarse en más del triple, y la tensión de cortocircuito del más pequeño debe de ser superior a la del más grande, de tal forma que el reparto de cargas entre ambos transformadores sea equitativo respecto a sus potencias nominales.

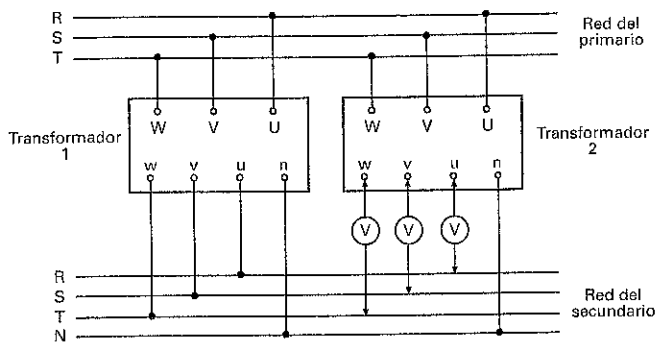


Figura 18.33. Verificación de terminales antes de conectar dos transformadores en paralelo.

18.14 Refrigeración de los transformadores

Si el calor que se produce en los transformadores por efecto de las pérdidas no se evacua convenientemente se puede producir la destrucción de los materiales aislantes de los devanados. Para evacuar este calor se emplean diferentes métodos de refrigeración en función de la potencia nominal del transformador y la ubicación del mismo, como por ejemplo:

Para transformadores de pequeña potencia (hasta 50 KVA) la refrigeración se realiza aprovechando el aire que envuelve a los mismos. Para ello se construye la cubierta con unas aberturas, con el fin de que el aire pueda circular de una forma natural por los mismos (ventilación por convección). En el caso de que esta ventilación no fuese suficiente, se añaden ventiladores que fuerzan la refrigeración del transformador.

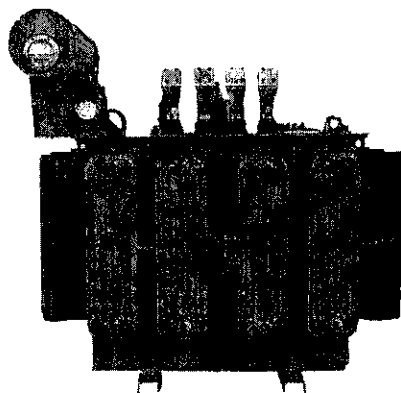


Figura 18.34. Transformador trifásico con refrigeración por aceite.

Para transformadores de distribución de media potencia (menos de 200 KVA) se sumergen en aceite mineral o silicón. El aceite transmite el calor del transformador al exterior por convección natural. Además, con el aceite se consigue mejorar el aislamiento de los devanados de alta tensión (Figura 18.34).

Para transformadores de distribución de gran potencia se añaden aletas de refrigeración en la cubierta exterior del mismo. Además se hace circular el aceite caliente desde el interior del transformador hacia dichas aletas con el fin de acelerar el proceso de refrigeración. Para transformadores de más potencia se pueden añadir ventiladores que fuerzan la evacuación de los radiadores externos.

En los transformadores con aceite, éste tiende a dilatarse con los aumentos de temperatura, por lo que para evitar sobrepresiones se coloca sobre la cuba de aceite un **depósito de expansión** de forma cilíndrica a medio llenar y en contacto con el exterior mediante un orificio. Para evitar la entrada de humedad del exterior al depósito, que podría alterar las cualidades del aceite, se coloca una especie de filtro que absorbe la humedad que pudiera entrar del exterior. Este dispositivo se conoce por el nombre de **dsecador** y suele ir dotado de sales absorbentes de la humedad, como por ejemplo el silicagel. Cuando el desecador, con el tiempo, se satura de humedad cambia de color, lo que nos indica que hay que renovar las sustancias de absorción.

Con el fin de dotar al sistema de refrigeración por aceite de un sistema de protección adecuado ante una sobrepresión en el circuito, se instala en el mismo el **relé Buchholz**. Este dispositivo se intercala en el circuito de refrigeración entre la cuba y el depósito de expansión. En caso de sobrepresiones en el circuito de refrigeración, bien ocasionadas por un cortocircuito o por una falta de aislamiento, el relé Buchholz puede desconectar el transformador o provocar una señal de alarma, dependiendo de la gravedad del incidente. También actúa en caso de un descenso rápido del nivel de aceite provocado por una fuga del mismo.

Para conocer en todo momento la temperatura del refrigerante se colocan termómetros que nos indican en todo momento el grado de sobrecarga del transformador.

18.15 Características de un transformador

Es importante conocer los datos característicos que es necesario aportar para realizar la adquisición de un transformador comercial para una determinada aplicación. Seguidamente indicamos los más relevantes:

- Potencia nominal asignada en KVA.
- Tensión primaria y secundaria.
- Regulación de tensión en la salida \pm %.
- Grupo de conexión.
- Frecuencia.
- Normas de aplicación.
- Temperatura máxima ambiente (si es $> 40^\circ$).
- Altitud de la instalación sobre el nivel del mar (si es > 1.000 m).

- ↳ Accesorios opcionales.
- ↳ Instalación en interior o bien a la intemperie.

Para determinar la potencia nominal se calcula el consumo máximo de potencia aparente previsible. Además se le añade una reserva de potencia por los posibles incrementos de potencia que se pudieran dar por ampliación de las instalaciones.

Para transformadores de distribución se opta por una tensión de cortocircuito porcentual ucc del 4%, con lo que se consigue reducir la caída de tensión del transformador a niveles reducidos. Por otro lado, para transformadores de gran potencia que operan en redes industriales se prefiere la utilización de una tensión de cortocircuito del 6%, evitando así intensidades de cortocircuito elevadas.

Para alturas superiores a los 1.000 m sobre el nivel del mar disminuyen las propiedades de los refrigerantes utilizados, así como la resistencia del aire. Es por eso que para la instalación de transformadores en zonas que se superen los 1.000 m sea necesario indicárselo al fabricante.

En el caso de instalaciones en las que la temperatura del recinto donde se va a emplazar el transformador sea superior a los 40° también es necesario indicarlo al fabricante, ya que esto puede afectar a la potencia nominal del transformador o al reforzamiento de los equipos de refrigeración.

18.16 Ensayos para transformadores monofásicos y trifásicos

Una vez acabada la construcción de los transformadores es necesario realizar una serie de ensayos con el fin de comprobar sus características. Para realizar estas pruebas será necesario seguir fielmente las normas reglamentarias que se indiquen en cada país, como por ejemplo, las normas UNE (Una Norma Española), CENELEC (Comite Electrotécnico para la Normalización Electrotécnica, CEI (Comite Electrotécnico Internacional), etc.

Los ensayos que se pueden realizar son muy variados, caben destacar:

- ↳ Medida de la resistencia de los arrollamientos.
- ↳ Medida de la relación de transformación y grupo de conexión.
- ↳ Ensayo en vacío.
- ↳ Ensayo en cortocircuito.
- ↳ Obtención de la característica exterior.
- ↳ Medida del rendimiento.
- ↳ Ensayos de calentamiento.
- ↳ Ensayos de aislamiento.

Para la medida de la resistencia de los arrollamientos primario y secundario la mejor opción consiste en utilizar puentes de medida que aseguren una gran precisión en su resultado.

Téngase en cuenta que la resistencia que se va a medir es bastante baja. En el caso de transformadores trifásicos habrá que tener en cuenta la conexión del arrollamiento, de tal forma, que si por ejemplo están conectados en estrella, al aplicar el óhmetro entre dos terminales se tome la medida de la resistencia de dos bobinas conectadas en serie.

Para la medida de la relación de transformación se pueden utilizar dos voltímetros de similares características, conectados uno en el primario y otro, en el secundario y con el transformador funcionando en vacío, procediéndose como se indica en el ensayo en vacío.

En el caso de tener que acoplar dos transformadores en paralelo es necesario que ambos sean del mismo grupo de conexión. Una forma de comprobarlo es medir la tensión entre cada uno de los terminales a conectar en el secundario de ambos transformadores, tal como ya indicamos en el Apartado 18.13.

Para obtener la característica exterior del transformador (tensión en bornes de la carga para diferentes corrientes de carga y factores de potencia) se pueden utilizar dos procedimientos: método directo e indirecto. El método directo consiste en tomar lectura de tensión, corriente y factor de potencia cuando se le somete al transformador a diferentes regímenes de carga (óhmico, inductivo, capacitivo). Este método sólo se utiliza para pequeños transformadores y de tensiones no muy elevadas. Para transformadores de gran potencia se pueden utilizar métodos indirectos, como el de Kaap, que consiste en realizar un estudio gráfico del diagrama de caída de tensión de un transformador, haciéndolo extensivo para diferentes corrientes de carga y factor de potencia.

La medida del rendimiento se realiza de forma indirecta, tomando los resultados de las pérdidas en el hierro y el cobre obtenidas de los ensayos en vacío y cortocircuito.

Para cualquier tipo de transformador es importante conocer su temperatura normal de trabajo. Además, siempre habrá que procurar que la temperatura no supere los límites indicados en las normas. Las temperaturas que más interesa conocer son las de los devanados y las del refrigerante (aceite mineral, silicona, piraleno, etc.). Para la medida de la temperatura de las diferentes partes del transformador se pueden utilizar termómetros o termopares. La medida de la temperatura de los devanados también se puede determinar teniendo en cuenta el aumento de resistencia, experimentado por los mismos al conectar la carga en el transformador. Para ello se emplearan las expresiones ya estudiadas en el Capítulo 2 de esta obra.

El estado de los aislamientos en un transformador es muy importante para alargar su vida y reducir las averías. Para comprobar los aislamientos de un transformador se pueden realizar distintas pruebas mediante un meghómetro o megger, como son: medida de resistencia entre conductores y masa, medida de resistencia entre conductores, medida de rigidez dieléctrica del aceite.

Actividades

1. Consigue un transformador monofásico y un trifásico, analiza las características de ambos y realiza el ensayo en vacío de los mismos. Una vez tomadas las lecturas de los aparatos de medida, determina la relación de transformación, las pérdidas en el hierro y la corriente de vacío.
2. Con los transformadores utilizados en la Actividad 18.1, realiza los ensayos en cortocircuito. Una vez tomadas las lecturas de los aparatos de medida, determina las pérdidas en el cobre para la potencia nominal, la tensión de cortocircuito y sus componentes y los parámetros R_{cc} , X_{cc} y Z_{cc} .
3. Consigue dos transformadores trifásicos de similares características, y teniendo en cuenta las consideraciones estudiadas, lleva a cabo su acoplamiento en paralelo.
4. Vamos a analizar cómo varía la tensión de salida de un transformador monofásico. Para ello conecta a su salida un voltímetro y un amperímetro, para después ir conectando diferentes cargas de carácter variable (resistencias, inductancia, condensadores). Anota los resultados y comprueba la dependencia de la caída de tensión de un transformador con el factor de potencia y la corriente de la carga.
5. Consulta en Internet (<http://www.t2000idiomas.com/electrotecnia>) sobre los temas relacionados con este capítulo e intenta contrastar y ampliar la información obtenida.

Como en otras ocasiones, al finalizar cada una de estas actividades deberás elaborar un informe-memoria sobre la actividad desarrollada, indicando los resultados obtenidos y estructurándolos en los apartados necesarios para una adecuada documentación de las mismas (descripción del proceso seguido, medios utilizados, esquemas y planos utilizados, cálculos, medidas, etc.)

Autoevaluación

- 1) Los transformadores se utilizan para:
 - a) Cambiar la tensión y corriente en líneas de C.A.
 - b) Cambiar la tensión y corriente en líneas de C.C.
 - c) Cambiar la potencia en líneas de C.A.
- 2) ¿Cómo se consigue transferir la energía eléctrica del primario al secundario de un transformador?
 - a) Gracias a los fenómenos de histéresis y Foucault
 - b) A través del núcleo de hierro común, que hace de contacto eléctrico entre ambos devanados
 - c) A través del núcleo de hierro común y mediante un campo magnético variable
- 3) ¿Cómo es posible aumentar la potencia nominal de un transformador comercial?
 - a) Elevando la tensión del primario
 - b) Refrigerándolo
 - c) Elevando el factor de potencia de la carga
- 4) ¿De qué depende fundamentalmente la fuerza electromotriz inducida en el secundario de un transformador?
 - a) Del número de espiras del secundario
 - b) De la corriente por el secundario
 - c) De la potencia nominal del transformador
- 5) ¿Qué ocurre si se aplica a un transformador una tensión superior a la nominal?
 - a) Que la tensión por el secundario aumenta en la misma proporción sin apreciarse cambios considerables en el comportamiento del transformador
 - b) La corriente de vacío tiende a elevarse a valores peligrosos para el transformador
 - c) Aumenta la potencia nominal del transformador
- 6) ¿De qué dependen las pérdidas en el cobre de un transformador?
 - a) De la corriente suministrada por el transformador y de la resistencia de los devanados
 - b) De la calidad del cobre utilizado
 - c) De la relación de transformación
- 7) Las pérdidas en el hierro de un transformador:
 - a) Son producidas por los efectos combinados de la histéresis y corrientes parásitas
 - b) Se determinan con el ensayo en cortocircuito
 - c) No cambian apreciablemente porque el transformador trabaja en vacío o en carga
- 8) Averiguar la relación de transformación y la tensión en el secundario de un transformador ideal con 5.000 espiras en el primario y 500 en el secundario. ¿Qué tensión aparece en el secundario si se conecta el primario a una red de C.A. de 220 V, 50 Hz?
- 9) Un transformador monofásico posee 350 espiras en el primario y 1.750 en el secundario. El flujo máximo que aparece en el núcleo magnético es de 4 mWb. Determina

- nar las tensiones en el primario y en el secundario para una frecuencia de 60 Hz, así como la relación de transformación (considerar el transformador como ideal).
- 10) Un transformador monofásico reductor de 380/127 V proporciona energía a un equipo frigorífico de 1.500 W, 127 V, $\cos \phi = 0,6$. Suponiendo la corriente de vacío y las pérdidas despreciables, determinar la intensidad por el primario y por el secundario, así como la relación de transformación del mismo.
- 11) Al someter a un ensayo de vacío a un transformador monofásico de 5 KVA, 10.000/398 V, 50 Hz, se obtienen los siguientes resultados: $V_1 = 1.000$ V, $V_2 = 398$ V, $A = 0,15$ A y $W = 20$ W. Determinar la relación de transformación, las pérdidas en el hierro y la corriente de vacío.
- 12) Al realizar un ensayo en cortocircuito a un transformador monofásico de 100 KVA, tensiones 6.000/230 V, es necesario aplicar al lado de alta tensión una tensión de 250 V para que por el primario circule la corriente nominal. Si la potencia absorbida en el ensayo es de 1.571 W, averiguar: a) las corrientes nominales del primario y del secundario; b) las pérdidas en el cobre para la potencia nominal; c) la tensión de cortocircuito y sus componentes; d) los parámetros R_{cc} , X_{cc} y Z_{cc} ; e) las pérdidas en el cobre cuando el transformador trabaje a 3/4 partes de su potencia nominal.
- 13) Se desea determinar el valor efectivo de la tensión de salida de un transformador monofásico a plena carga con un FP de 0,8. Las características del mismo son: 100 KVA; 2.000/230 V; $u_{Rcc} = 3,7\%$; $u_{Xcc} = 2,3\%$. Averiguar también el valor efectivo de la corriente de cortocircuito en ambos devanados y la tensión en la carga cuando el transformador suministre una potencia de 25 KVA con un factor de potencia de 0,8.
- 14) Las características de un transformador monofásico son las siguientes: 50 KVA, 398/220 V, potencia de ensayo en vacío = 100 W, potencia de ensayo en cortocircuito = 300 W. Determinar el rendimiento a plena carga y $\cos \phi = 0,87$.
- 15) Se desea determinar el valor efectivo de la tensión de salida y el rendimiento de un transformador monofásico a plena carga con un FP inductivo de 0,85. Las características del mismo son: 10 KVA, 398/230 V. En el ensayo de cortocircuito se han obtenido los siguientes resultados: ha consumido 360 W al aplicar una tensión de 16 V cuando circulaba una corriente por el primario de 25 A. En el ensayo en vacío se ha medido una potencia de 90 W. Averiguar también la corriente de cortocircuito en ambos devanados
- 16) ¿Qué ventajas presentan los bancos de transformadores monofásicos para sistemas trifásicos?
- Son más económicos
 - Fácil transporte por carretera de transformadores de gran potencia
 - Poseen un mayor rendimiento
- 17) Un transformador trifásico con un grupo de conexión Dz6 indica que:
- Devanado de alta tensión conectado en triángulo, el de baja en zig-zag y un desfase de 0°
 - Devanado de baja tensión conectado en triángulo, el de alta en zig-zag y un desfase de 180°
 - Devanado de alta tensión conectado en triángulo, el de baja en zig-zag y un desfase de 180°
- 18) ¿Qué consideraciones hay que tener en cuenta para poder acoplar dos transformadores en paralelo?
- El grupo de conexión ha de ser el mismo
 - Su potencia nominal debe ser exactamente igual
 - Para potencias nominales iguales en ambos transformadores sus caídas de tensión de cortocircuito pueden ser diferentes
- 19) Los datos obtenidos al someter a un transformador trifásico de 100 KVA, 12.000/398 V con un grupo de conexión Dy5, a un ensayo en vacío son: potencia trifásica absorbida = 400 W; corriente medida en la línea del lado de alta tensión = 0,2 A. Determinar: a) la relación de tensiones simples y compuesta; b) la corriente de vacío; c) las pérdidas en el hierro.
- 20) Los datos obtenidos al someter a un transformador trifásico de 250 KVA, 17,5 KV/398 V con un grupo de conexión Dy11, a un ensayo en cortocircuito son: potencia trifásica absorbida = 4.010 W; corriente medida en la línea del lado de alta tensión = 8,25 A; tensión medida entre fases del primario 700 V. En el ensayo en vacío se han medido 675 W. Determinar: a) las pérdidas en el cobre y el factor de potencia de cortocircuito; b) la tensión porcentual de cortocircuito y sus componentes; c) tensión compuesta en la carga cuando el transformador trabaje a plena carga y con un factor de potencia inductivo de 0,85; d) rendimiento del transformador en estas condiciones; e) la intensidad de cortocircuito accidental por las fases del primario.