

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).

$N_1 = N^\circ$ de espiras del primario

$N_2 = N^\circ$ de espiras del secundario

$V_1 =$ Tensión del primario

$V_2 =$ Tensión del secundario

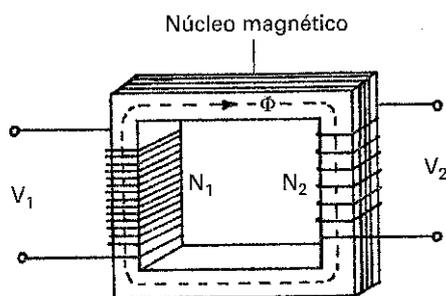


Figura 18.1. Transformador elemental.

¿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.

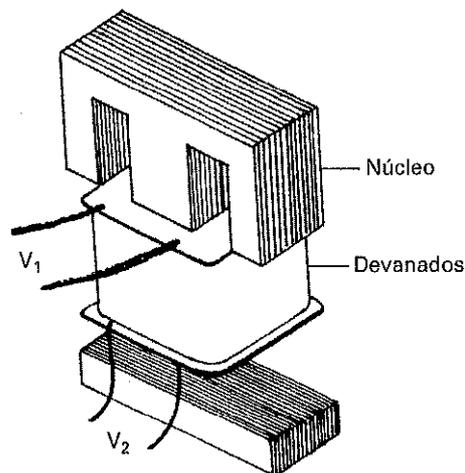


Figura 18.2. Constitución de un transformador monofásico.

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 abraza 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:

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

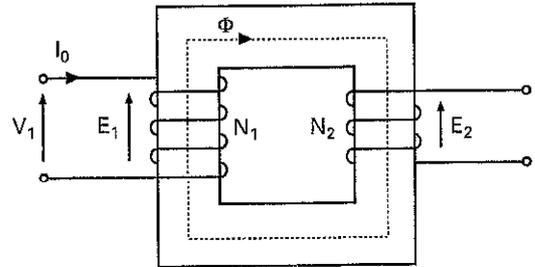


Figura 18.5. Transformador ideal en vacío.

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:

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

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.

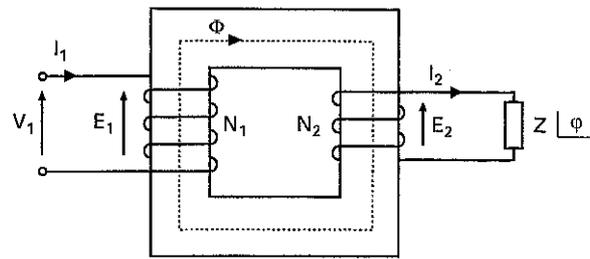


Figura 18.6. Transformador ideal en carga.

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).

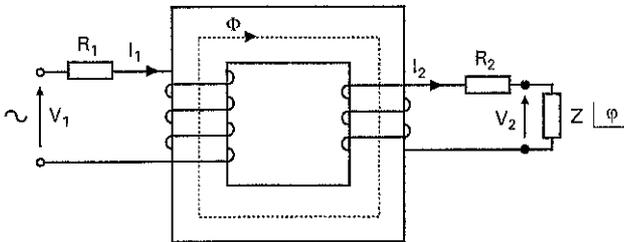


Figura 18.7. Resistencias óhmicas de los devanados en un transformador real.

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} .

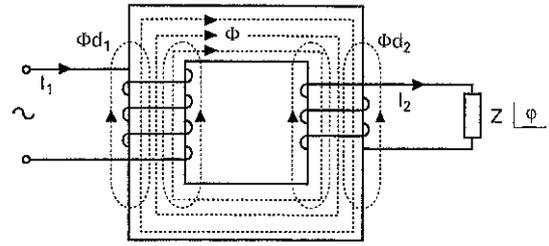


Figura 18.8. Flujo de dispersión en un transformador real.

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

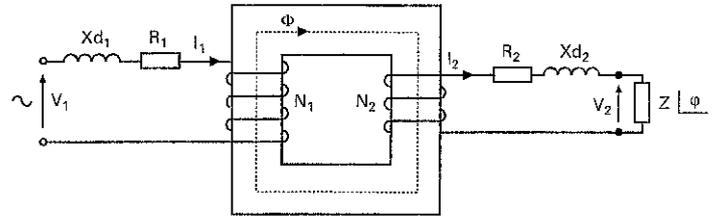


Figura 18.9. Circuito equivalente de un transformador real.

- 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).

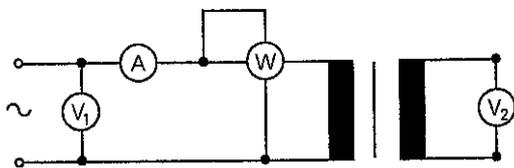


Figura 18.10. Ensayo en vacío de un transformador monofásico.

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 amperivoltajes puede quedar así:

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

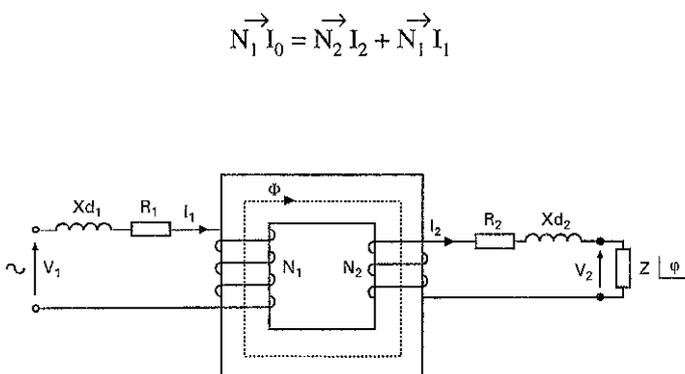


Figura 18.11. Transformador real en carga.

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} .

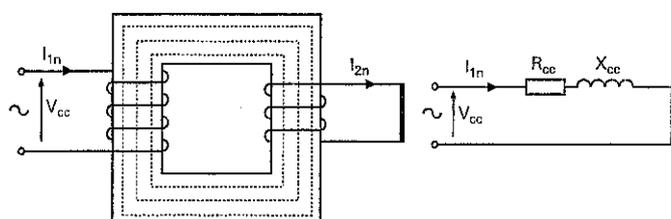


Figura 18.12. Circuito equivalente en cortocircuito del transformador.

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

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

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

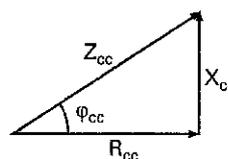


Figura 18.13

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.

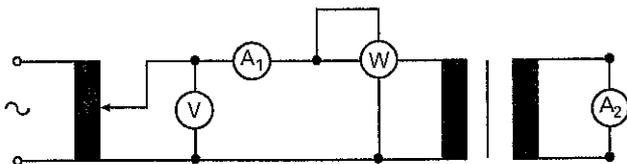


Figura 18.14. Esquema de conexiones para realizar el ensayo en cortocircuito de un transformador monofásico.

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.

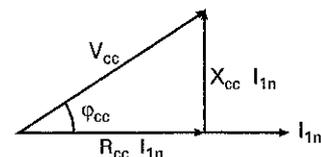


Figura 18.15

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

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

$u_{R_{cc}}$ = Caída de tensión óhmica de cortocircuito porcentual

$u_{X_{cc}}$ = Caída de tensión inductiva de cortocircuito porcentual

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

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

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

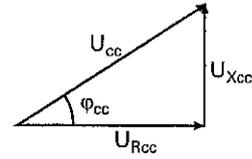


Figura 18.16. Triángulo de tensiones de cortocircuito porcentuales.

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.

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	1,9	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:

$$I_{1n} = \frac{S_n}{V_{1n}} = \frac{250.000}{24.000} = 10,4 \text{ A}$$

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

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:

$$\cos \varphi_{cc} = \frac{P_{cc}}{V_{cc} I_{1n}} = \frac{4.010}{960 \cdot 10,4} = 0,4 \Rightarrow \varphi_0 = 66,3^\circ$$

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

$$u_{cc} = \frac{V_{cc}}{V_{1n}} \cdot 100 = \frac{960}{24.000} \cdot 100 = 4 \%$$

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:

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

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

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

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).