

Universidad
Carlos III de Madrid



GRADO EN INGENIERÍA ELECTRICA
CIRCUITOS MAGNÉTICOS Y TRANSFORMADORES

TEMA 3. TRANSFORMADORES MONOFÁSICOS

JUAN CARLOS BURGOS



ÍNDICE TEMA 3. TRANSFORMADORES MONOFÁSICOS

3.1. EL TRANSFORMADOR EN VACIO 3

3.2. FUNCIONAMIENTO EN CARGA..... 10

3.3 POTENCIA NOMINAL.....14

3.4. SOBRECARGAS ADMISIBLES.....15

3.5. CIRCUITO EQUIVALENTE 16

3.6. CAÍDA DE TENSIÓN EN UN TRANSFORMADOR 19

3.7. RENDIMIENTO DE UN TRANSFORMADOR 21

3.8. REPARTO DE CARGA ENTRE TRANSFORMADORES EN PARALELO ..23

3.9. ACCIDENTE DE CORTOCIRCUITO..... 26

3.10 CORRIENTE DE CONEXIÓN DE UN TRANSFORMADOR 30

TEMA 3

TRANSFORMADORES MONOFÁSICOS

3.1 TRANSFORMADOR EN VACIO

Para comenzar a estudiar el funcionamiento de un transformador, analizaremos el caso más sencillo, que es el que se tiene cuando un arrollamiento está conectado a una fuente de tensión sinusoidal y el otro arrollamiento está a circuito abierto (sin carga alguna), tal como se muestra en la figura 3.1.

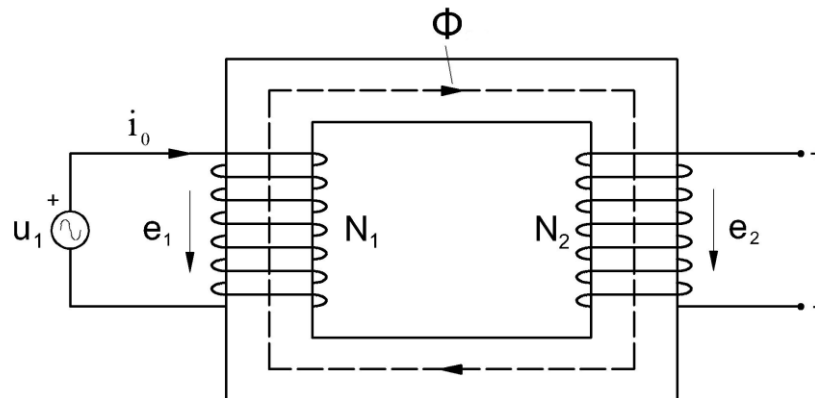


Figura 3.1: El transformador monofásico en vacío

Análisis simplificado

Inicialmente supondremos que la resistencia del hilo de cobre que forma el arrollamiento primario es nula y que todo el flujo que concatena el primario concatena también al secundario.

Se parte de que la tensión aplicada es conocida, y sigue la ley

$$u_1 = \sqrt{2}U_{1N} \text{sen} \omega t \quad (3.1)$$

Deseamos conocer el valor de las siguientes magnitudes: f.e.m. inducida en el primario¹, f.e.m. inducida en el secundario, flujo en el núcleo, e intensidad en el primario. Resolveremos el problema en el dominio del tiempo, pues como se verá el circuito magnético tiene un comportamiento no lineal.

Para obtener la f.e.m. inducida en el primario aplicamos la 2ª Ley de Kirchoff a la malla del primario:

$$\sum U = 0 \rightarrow e_1 = u_1 \quad (3.2)$$

El significado de la ecuación (3.2) es que al no haber caídas de tensión en la resistencia interna del arrollamiento, la tensión aplicada ha de verse compensada con la f.e.m. engendrada en el arrollamiento. De donde

$$e_1 = \sqrt{2}U_{1N} \text{sen} \omega t \quad (3.3)$$

Para obtener el valor del flujo aplicamos la **Ley de Faraday** al arrollamiento primario:

¹ Nótese que la tensión aplicada al transformador y la f.e.m. inducida son cosas conceptualmente diferentes. La tensión aplicada es una diferencia de potencial proporcionada por una fuente, mientras que la f.e.m. inducida es una diferencia de potencial que se produce en tanto en cuanto las espiras del transformador están siendo recorridas por un flujo que varía en el tiempo.

$$e_1 = +N_1 \frac{d\phi}{dt} \quad (3.4)$$

y despejando el flujo

$$\phi = \int \frac{1}{N_1} e_1 dt \quad (3.5)$$

Con lo que el flujo vale

$$\Phi = \int \frac{1}{N_1} \sqrt{2} U \operatorname{sen} \omega t dt \rightarrow \Phi = \frac{-\sqrt{2} U}{N_1 \omega} \cos \omega t \quad (3.6)$$

El flujo, por tanto es una senoide desfasada 90° de la tensión como se muestra en la figura (3.2).

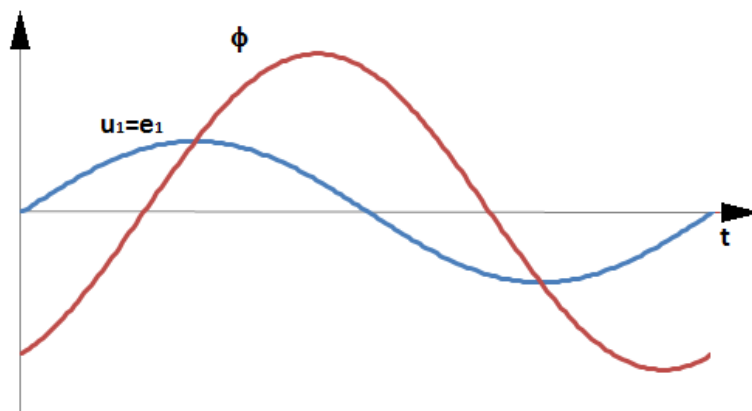


Figura 3.2: Tensión aplicada y flujo en el transformador

Basándonos en la ecuación anterior podemos relacionar el valor de cresta del flujo con el valor eficaz de la tensión aplicada

$$\Phi = \sqrt{2} \frac{U_{1N}}{N_1 2\pi f} \quad (3.7)$$

Esto es

$$U_1 = 4.44 f N_1 \Phi \quad (3.8)$$

La conclusión a la que acabamos de llegar puede parecer sorprendente: Según la ley de Ampere el flujo es creado por las corrientes; sin embargo, nosotros sin saber todavía cuánta corriente consume la máquina ya conocemos cuánto flujo hay. Sin embargo, si se piensa bien, esto no es sorprendente: Imaginémonos, por ejemplo, que la tensión aplicada fuera un poco mayor a la f.e.m. que contrarresta dicha tensión (fuerza contraelectromotriz); el desequilibrio entre la tensión aplicada y la f.e.m. que se opone a la circulación de corriente haría que la fuente inyectara más corriente en el transformador, que crearía más flujo, con lo que la f.e.m. aumentaría hasta que se alcanzara un equilibrio entre f.e.m. y tensión aplicada.

Para obtener la f.e.m. en el secundario aplicamos la **Ley de Faraday**

$$e_2 = +N_2 \frac{d\phi}{dt} \quad (3.9)$$

Aplicando la segunda ley de Kirchoff a la malla del secundario la tensión en bornas del transformador resulta ser igual a la f.e.m., ya que al no circular corriente por el secundario no hay caídas de tensión en dicho arrollamiento.

$$\sum u = 0 \rightarrow e_2 = u_2 \quad (3.10)$$

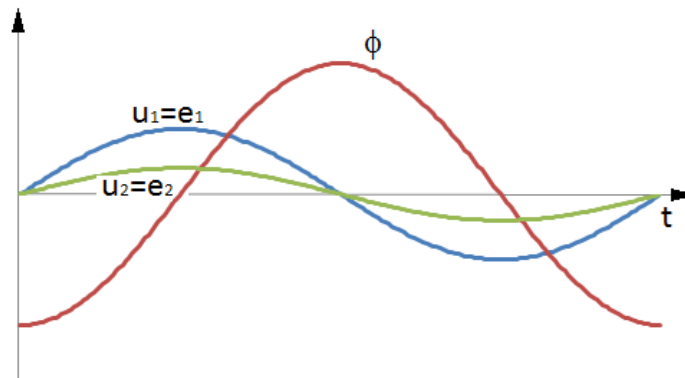


Figura 3.3: Tensión y fuerza electromotriz en el secundario

Las tensiones en bornas de primario (u_1) y de secundario (u_2) son dos sinusoides en fase, de la misma frecuencia, pero con distinto valor eficaz (figura 3.3). Esta es la misión básica del transformador: proporcionar por su secundario una tensión proporcional a la del primario. El cociente entre la f.em. primaria y secundaria se denomina relación de transformación

$$r_t = \frac{E_1}{E_2} = \frac{N_1}{N_2} \quad (3.11)$$

Nos resta por obtener la intensidad que consume el primario del transformador. Acabamos de obtener el flujo que hay en el transformador, pero la ley de Ampere nos dice que el flujo es creado por la corriente eléctrica ¿cuánta intensidad consume el transformador?: La precisa para crear el flujo mencionado.

La curva de magnetización de la chapa magnética (curva B-H) nos indica cuánto campo magnético se precisa para crear la inducción. Esta curva es (a otra escala) la misma que relaciona el flujo con la intensidad precisa para crearlo, ya que la inducción es proporcional al flujo y el campo magnético es proporcional a la corriente (figura 3.4)

$$B = \frac{\phi}{S_{Fe}}$$

$$H = \frac{N_1 i_0}{l_{Fe}}$$

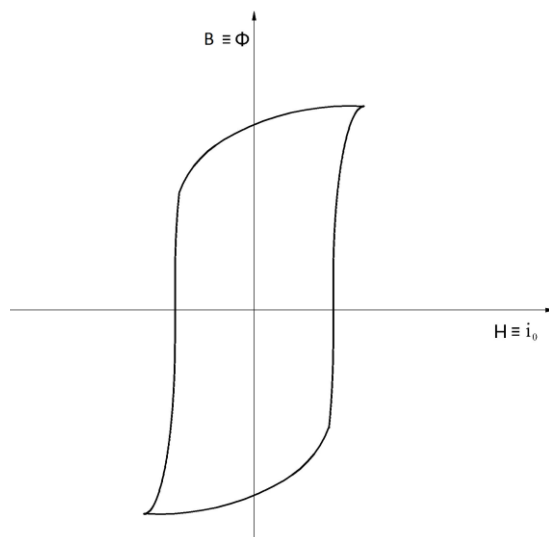


Figura 3.4: Relación entre el flujo y la intensidad precisa para crearlo

Por tanto, para obtener la corriente de vacío, en cada instante de tiempo veremos cuánto flujo hay y acudiremos a la curva de magnetización para obtener la corriente precisa para crear ese flujo (figura 3.5).

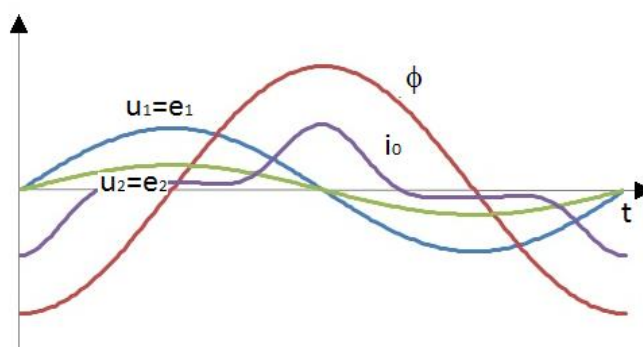


Figura 3.5: Corriente de vacío del transformador

Como vemos, la intensidad de vacío es una corriente no sinusoidal. En aquellos instantes de tiempo en los que la intensidad es nula el flujo magnético no es nulo, sino que su valor es el flujo remanente, debido a la histéresis (recuerdo magnético). Sin embargo, los máximos de la onda de corriente se alcanzan en los mismos instantes de tiempo que los máximos de la onda de flujo.

Cuanto más saturado se encuentre el núcleo magnético más no lineal es la curva B-H, y por ello menos sinusoidal es la corriente consumida (el valor de pico de la corriente crece mucho). Una onda no sinusoidal se puede expresar como suma de sinusoides (descomposición en serie de Fourier), cuanto más saturado esté el núcleo magnético mayor es el valor de los armónicos en relación a la componente fundamental de la intensidad.

En este apartado se ha calculado la corriente de vacío a partir de la curva de magnetización de la figura 3.4, sin embargo, cuando se trata de razonar cómo varía la corriente de vacío al variar alguno de los parámetros del transformador (por ejemplo la tensión aplicada) es más cómodo trabajar con la curva B-H sin área (curva DC de la figura 1.16 del tema 1) y sobre la expresión de las pérdidas en el hierro en función de la inducción.

Continuar el estudio de los transformadores teniendo en cuenta que la intensidad de vacío es no sinusoidal hace muy complicado el estudio futuro, de modo que cuando sea preciso considerarla² la

² Como se verá más adelante en la mayoría de las ocasiones se puede despreciar.

aproximamos a una senoide que tenga su mismo valor eficaz y que presente un desfase respecto de la onda de tensión tal que justifique las pérdidas en el hierro.

La corriente de vacío de los transformadores actuales es muy reducida (del orden del 0,5% de la corriente asignada), por tanto en un transformador en carga es frecuente despreciar esta corriente.

Análisis considerando la resistencia de los arrollamientos y el flujo disperso

En el estudio realizado se ha despreciado la resistencia de los arrollamientos y se ha admitido que todo el flujo que concatena al primario también concatena al secundario. En realidad, el arrollamiento de un transformador sí que tiene resistencia y además el flujo que concatena al primario no es el mismo que el que concatena al secundario, ya que hay unas ciertas líneas de flujo disperso. El flujo total que concatena al primario es la suma del flujo común a primario y secundario más el flujo disperso

Para comprender lo difícil que sería el estudio del transformador real en vacío, vamos a plantear las ecuaciones que lo rigen.

De forma similar a lo que se hizo para el caso ideal, el dato del problema es la tensión aplicada, y las incógnitas (figura 3.6) las f.e.m. primaria y secundaria (e_{1T} y e_2), el flujo común (ϕ) y el flujo disperso del primario (ϕ_{1d}), la tensión en bornas del secundario (u_2) y la corriente primaria (i_0). Tenemos pues 6 incógnitas, con lo que precisamos seis ecuaciones (siete si consideramos también el flujo total, ϕ_{1T}).

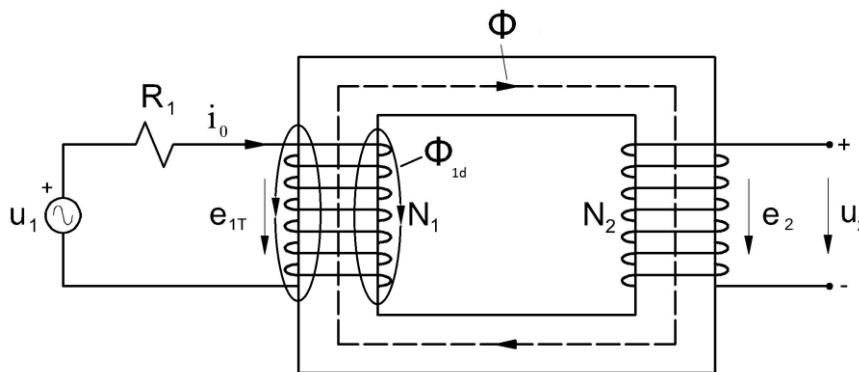


Figura 3.6: El transformador real en vacío

Las ecuaciones que rigen este caso son

$$u_1 = R_1 i_0 + e_{1T} \quad (3.12)$$

$$u_2 = e_2 \quad (3.13)$$

$$e_{1T} = N_1 \frac{d\phi_{1T}}{dt} \quad (3.14)$$

$$\phi_{1T} = \phi_{1d} + \phi \quad (3.15)$$

$$e_2 = N_2 \frac{d\phi}{dt} \quad (3.16)$$

Las dos ecuaciones que nos faltan son las que relacionan el flujo con la corriente precisa para crearlo.

El flujo común transcurre íntegramente por el hierro, por tanto la relación entre el flujo común y la corriente de vacío es, a otra escala, la curva de magnetización de las chapas magnéticas, como ya ocurría en el caso ideal.

Por lo que se refiere al flujo disperso, aplicando la ley de Ampere a una línea de flujo disperso se llega a la (importante) conclusión de que el flujo disperso (que concatena a uno sólo de los arrollamientos)

es creado por la intensidad del arrollamiento al que concatena³. La relación entre el flujo disperso y la intensidad que lo crea se puede escribir como

$$\phi_{1d} = \frac{N_1 i_0}{\mathfrak{R}_{disp}} \quad (3.17)$$

Como se verá próximamente la reluctancia que se ofrece al paso del flujo disperso es constante, y por tanto es flujo disperso es proporcional a la intensidad que lo crea. En esas circunstancias se puede definir una inductancia de dispersión

$$L_{1d} = \frac{N_1^2}{\mathfrak{R}_{disp}} = \frac{N_1 \phi_{1d}}{i_0} \quad (3.18)$$

De esta forma, en la ecuación (3.14) se puede separar el efecto del flujo común y del flujo disperso

$$u_1 = R_1 i_0 + L_{1d} \frac{di_0}{dt} + e_1 \quad (3.19)$$

$$e_1 = N_1 \frac{d\phi}{dt} \quad (3.20)$$

Con estas ecuaciones podemos establecer el modelo para el transformador en vacío que se muestra en la figura 3.7:

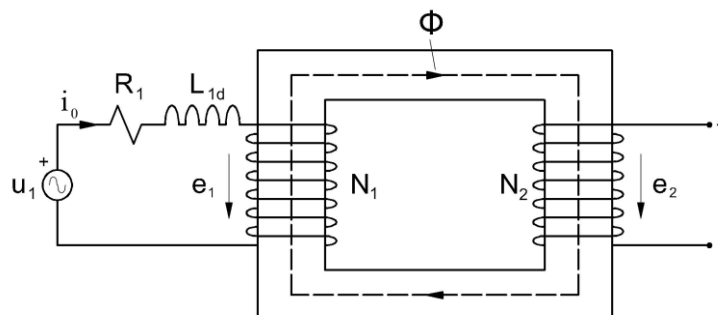


Figura 3.7: Modelo para el transformador monofásico en vacío

Quedó pendiente el análisis de la reluctancia que se le ofrece al paso del flujo de dispersión. Como se muestra en la figura 3.6, el circuito magnético que recorre el flujo disperso está compuesto por hierro en parte de su recorrido y por el aire en otra parte. En un circuito serie la reluctancia es la suma de las reluctancias.

$$\mathfrak{R}_{disp} = \mathfrak{R}_{Fe} + \mathfrak{R}_{aire} \quad (3.21)$$

La reluctancia del hierro es mucho menor que la del aire, por lo que es despreciable frente a esta.

³ A diferencia del flujo común, que concatena a ambos arrollamientos y que como se verá en el próximo apartado es creado por los amperios-vuelta de ambos arrollamientos.

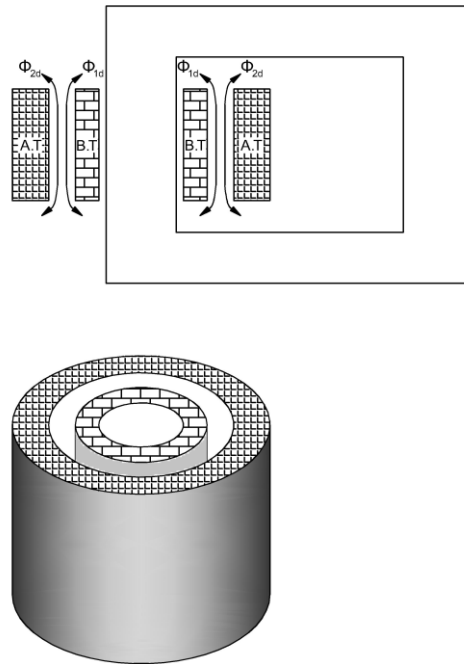


Figura 3.7: Disposición de los arrollamientos en un transformador monofásico de columnas

La figura 3.6 no representa bien la realidad, ya que en la práctica los arrollamientos primario y secundario son cilindros concéntricos, como se muestra en la figura 3.7. Para que las líneas de flujo concatenen sólo a un arrollamiento es preciso que retornen por el cilindro hueco comprendido entre el cilindro interno y el la parte interna del cilindro externo. La reluctancia de ese espacio es:

$$\mathfrak{R}_{\text{aire}} = \frac{1}{\mu_0} \frac{h}{\frac{\pi}{4} (D_{\text{ext}}^2 - D_{\text{inf}}^2)} \quad (3.22)$$

En la práctica, la expresión de la reluctancia es un poco más complicada debido al hecho de que parte del flujo disperso atraviesa el propio arrollamiento primario o secundario⁴, pero el razonamiento anterior nos permite comprender que la reluctancia que se le ofrece al paso del flujo disperso, depende de la altura los arrollamientos (h) y de la separación de estos⁵.

⁴ La expresión (3.22) sería cierta si el espesor de los arrollamientos fuera nulo. El flujo que atraviesa el espesor w_1 del arrollamiento primario y el espesor w_2 del arrollamiento secundario es también flujo disperso, de modo que una expresión aproximada para la reluctancia que se ofrece al paso del flujo disperso es

$$\mathfrak{R}_{cc} = \frac{1}{\mu_0} \frac{h}{l_m \left(\frac{w_1}{3} + d + \frac{w_2}{3} \right)}$$

Donde h es la altura de los arrollamientos (supuestos de igual altura), l_m es la longitud de la circunferencia media entre arrollamientos, w_1 y w_2 la anchura radial de los arrollamientos y d la distancia entre arrollamientos. En realidad, la expresión anterior considera que las líneas de inducción son axiales, y ocurre que en los extremos de los arrollamientos se produce efecto de borde, que hace que las líneas de inducción se curven. Para tener en cuenta la curvatura de las líneas de inducción, en la expresión anterior se utiliza una altura equivalente obtenida dividiendo la altura de los arrollamientos entre el llamado factor de Rogowski

La inductancia asociada al flujo disperso será

$$L_{cc} = \frac{N_1^2}{\mathfrak{R}_{cc}}$$

⁵ De modo que cuanto más separados estén los arrollamientos más flujo disperso hay y cuanto mayor sea la altura de los arrollamientos menos flujo disperso hay.

Como se ha podido ver las ecuaciones expuestas en este apartado son bastante más complicadas que las del transformador ideal. En este caso la ecuación (3.8) no es estrictamente cierta sino que tiene carácter aproximado:

$$U_1 \approx 4,44 f N_1 \Phi \quad (3.8\text{bis})$$

La consideración de la existencia del flujo de dispersión y su diferenciación frente al flujo común tiene una importancia fundamental para el estudio de los transformadores de potencia. Resumiendo lo visto en este apartado, y adelantando ideas que veremos en próximos apartados, las razones que avalan la necesidad de estudiar de forma diferenciada el flujo común y el flujo disperso son:

- El flujo común es creado por los amperios-vuelta de primario y de secundario, mientras que el flujo disperso sólo es creado por los amperios-vuelta del arrollamiento al que concatena
- El flujo común discurre por un circuito de reluctancia variable (pues la permeabilidad del hierro depende del grado de saturación del circuito magnético), mientras que la reluctancia que se ofrece al paso del flujo disperso es casi constante. Esto se traduce que así como se ha definido una inductancia de dispersión asociada al flujo disperso, el definir una inductancia L_m asociada al flujo común tiene un carácter meramente simbólico, pero sin utilidad práctica a la hora de cuantificar o escribir una ecuación representativa, ya que es una inductancia no constante.
- Las inductancias de dispersión⁶ y magnetizante se pueden obtener de forma separada mediante ensayos
- Como se puede demostrar, el flujo común depende de la tensión aplicada, mientras que el flujo disperso depende de la intensidad consumida por el transformador.
- Como se verá en próximos apartados el flujo común es casi constante, mientras que el flujo disperso es muy variable

3.2. FUNCIONAMIENTO EN CARGA

De forma semejante a como se ha hecho en el estudio del transformador en vacío, el estudio del transformador en carga se realizará en primer lugar suponiendo el transformador ideal, y seguidamente analizaremos el transformador real.

Análisis simplificado

Para analizar el funcionamiento en carga de un transformador de forma simplificada, admitiremos que los arrollamientos primario y secundario carecen de resistencia y que el flujo que concatena al secundario es idéntico al que concatena al primario.

⁶ En realidad la inductancia de cortocircuito, que se definirá más adelante.

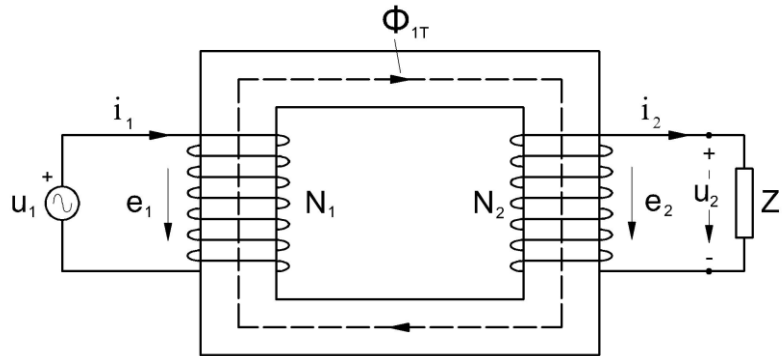


Figura 3.8: El transformador ideal en carga

En la figura 3.8 se muestran las principales variables del transformador en este caso. El dato del problema es la tensión aplicada u_1 . Deseamos conocer las f.e.m. primaria y secundaria (e_1 y e_2), el flujo (Φ_{1T}), la tensión en bornas del secundario (u_2) y las intensidades primaria y secundaria (i_1, i_2).

Las ecuaciones que rigen el funcionamiento del transformador en este caso son

$$2^{\text{a}} \text{ Ley de Kirchhoff aplicada al primario} \dots\dots\dots u_1 = e_1 \quad (3.23)$$

$$\text{Ley de Faraday aplicada al primario} \dots\dots\dots e_1 = N_1 \frac{d\phi}{dt} \quad (3.24)$$

$$\text{Ley de Faraday aplicada al secundario} \dots\dots\dots e_2 = N_2 \frac{d\phi}{dt} \quad (3.25)$$

$$2^{\text{a}} \text{ Ley de Kirchhoff aplicada al secundario} \dots\dots\dots u_2 = e_2 \quad (3.26)$$

Las ecuaciones (3.23) a (3.26) son las mismas que se utilizaron en el estudio del transformador en vacío, de forma que si la tensión aplicada al primario es la misma el resto de las variables también serán iguales en los dos casos analizados, en particular, en el transformador ideal el flujo es el mismo en vacío que en carga.

Nótese que hasta aquí todas las variables son sinusoidales y de idéntica frecuencia.

Una vez obtenida la tensión secundaria, de las ecuación (3.26), la intensidad secundaria se obtendrá de las ecuaciones de la carga. Por ejemplo, si la carga es inductivo-resistiva se tendrá

$$u_2 = R_L i_2 + L_L \frac{di_2}{dt} \quad (3.27)$$

Los signos de la ecuación anterior corresponden a una referencia de corriente entrando en la carga por el terminal positivo, esto es, corriente saliente del transformador, tal como se muestra en la figura 3.8.

La corriente que satisface la ecuación (3.27) es una corriente puramente sinusoidal, dado que la tensión u_2 también lo es.

Resta ahora obtener la intensidad que circula por el arrollamiento primario. Para obtenerla aplicamos la ley de Ampere a una línea cerrada que transcurra por el circuito del flujo común (como la dibujada en puntos en la figura 3.8) se tiene

$$\int \vec{H} \cdot d\vec{l} = H l_{Fe} = N_1 i_1 - N_2 i_2 \quad (3.28)$$

Como se ve, en un transformador en carga el flujo común es creado por la acción conjunta de los amperios-vuelta de primario y de secundario. El signo de las intensidades en la ecuación (3.28) se

debe a la referencia adoptada para las corrientes: entrante al transformador en el caso del primario y saliente al transformador en el caso del secundario.

Dado que, como se dijo, el flujo en vacío es igual al flujo en carga, los amperios vuelta precisos para crearlo también deben ser idénticos en los dos casos.

$$N_1 i_0 = N_1 i_1 - N_2 i_2 \quad (3.29)$$

De la ecuación (3.29) podemos obtener el valor de la intensidad primaria

$$i_1 = i_0 + \frac{N_2}{N_1} i_2 \quad (3.30)$$

Como se ve, el primario del transformador toma una intensidad de la fuente que es la suma de la que se precisa para crear el flujo más la precisa para cancelar los amperios-vuelta del secundario.

El primero de los dos sumandos (la corriente de vacío) es una corriente no sinusoidal, mientras que el segundo (la corriente precisa para cancelar los amperios-vuelta secundarios) que sí que es sinusoidal. La corriente de vacío en los transformadores actuales es inferior al 0,5% de la corriente de carga. Por eso, la suma de los sumandos anteriores es muy aproximadamente sinusoidal. Por tanto, en un transformador la única magnitud no sinusoidal es la corriente de vacío. Si esta corriente la sustituimos por la senoide definida cuando estudiamos el transformador en vacío todas las magnitudes resultan sinusoidales. Esto nos permite que en lo sucesivo, en lugar de estudiar el transformador en el dominio del tiempo, planteemos las ecuaciones fasoriales del transformador.

Análisis considerando la resistencia de los arrollamientos y el flujo disperso

En un transformador real los arrollamientos tienen resistencia y existe un cierto flujo que concatena al arrollamiento primario pero no al secundario o viceversa. El tratamiento del flujo de dispersión secundario será análogo al que realizamos para el primario, esto es, definiremos una inductancia de dispersión que tiene en cuenta el flujo de dispersión secundario (figura 3.9).

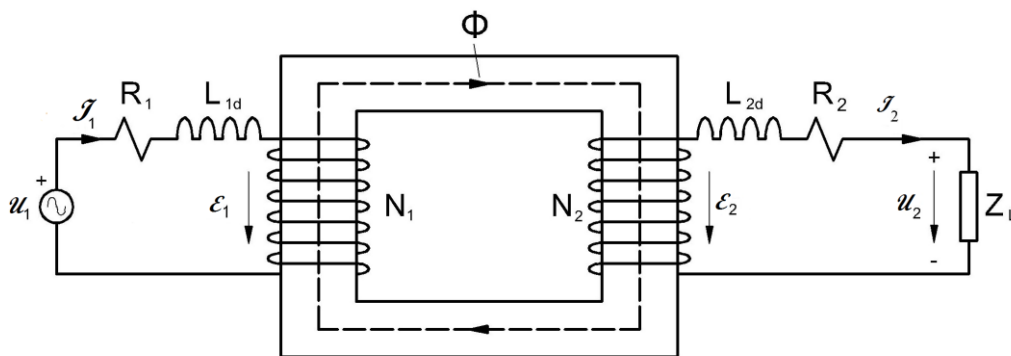


Figura 3.9: Resistencia de los arrollamientos y reactancias de dispersión en un transformador real

Las ecuaciones del transformador en este caso son

$$\bar{U}_1 = R_1 \bar{I}_1 + j\omega L_{d1} \bar{I}_1 + \bar{E}_1 \quad (3.31)$$

$$\bar{E}_1 = j\omega N_1 \bar{\Phi} \quad (3.32)$$

$$\bar{E}_2 = j\omega N_2 \bar{\Phi} \quad (3.33)$$

$$\bar{U}_2 = \bar{E}_2 - R_2 \bar{I}_2 - j\omega L_{d2} \bar{I}_2 \quad (3.34)$$

$$\bar{U}_2 = \bar{Z}_L \bar{I}_2 \quad (3.35)$$



Ahora bien, al haber unas caídas de tensión en el arrollamiento primario ya no se puede afirmar que la f.e.m. en vacío y en carga van a ser iguales, con lo que el flujo común no va a ser igual en vacío que en carga y por tanto la intensidad precisa para crearlos tampoco es igual. No obstante, siempre es posible escribir la corriente primaria como suma de la que se precisa para crear el nuevo flujo más la que se precisa para vencer los amperios-vuelta del secundario

$$\bar{I}_1 = \bar{I}'_0 + \frac{N_2}{N_1} \bar{I}_2 \quad (3.36)$$

En la práctica, las corrientes I_0 e I'_0 son muchísimo menores que la que se precisa para vencer los amperios-vuelta del secundario, y sería muy engorroso hacer una distinción entre I_0 e I'_0 , por tanto en la práctica no se hace distinción alguna entre ambas corrientes⁷.

Merece la pena detenerse un momento en analizar cómo son los diferentes flujos en el transformador en carga, ya que tienen una gran influencia en muchos aspectos del funcionamiento del transformador. La ecuación (3.18) puede seguir utilizándose en el transformador en carga, sin más que sustituir la corriente de vacío por la corriente del arrollamiento primario.

$$\bar{\Phi}_{1d} = \frac{L_{1d} \bar{I}_1}{N_1} \quad (3.37)$$

De modo que el flujo de dispersión aumenta al aumentar la corriente consumida por el transformador. El flujo de dispersión creado por el arrollamiento primario es una pequeña parte del flujo total que concatena al primario⁸.

La caída de tensión en la resistencia del arrollamiento primario es muy pequeña⁹, con lo que si en la ecuación (3.31) se desprecia el sumando $R_1 I_1$ y se sustituyen los dos sumandos restantes en función del flujo común (ecuación 3.32) y del flujo disperso (ecuación 3.37) queda

$$U_1 \approx j\omega N_1 \bar{\Phi}_{1d} + j\omega N_1 \bar{\Phi}_1 = j\omega N_1 \bar{\Phi}_{1T} \quad (3.38)$$

Con lo que la relación entre el valor eficaz de la tensión aplicada y el valor de cresta de la senoide de flujo es:

$$U_1 \approx 4,44 f N_1 \Phi_{1T} \quad (3.39)$$

La ecuación (3.39) nos dice que si se aplica al transformador una senoide con un valor eficaz constante¹⁰ el flujo total que concatena el arrollamiento primario es prácticamente constante.

Nos resta por analizar el flujo común. El flujo en el núcleo es la resta fasorial del flujo total que concatena al arrollamiento primario y del flujo disperso

$$\bar{\Phi} = \bar{\Phi}_{1T} - \bar{\Phi}_{1d} \quad (3.40)$$

El flujo total está en cuadratura y en retraso con la tensión aplicada al primario (figura 3.2), mientras que el flujo disperso está en fase con la corriente que lo crea. Esta diferencia entre los ángulos de fase del flujo total primario y del flujo disperso hace que el flujo común en carga sea un poco menor que en vacío en caso de que la carga sea de tipo inductivo (lo habitual) mientras que en caso de carga de tipo

⁷ De hecho muy frecuentemente se desprecia la corriente de vacío frente a la componente de carga

⁸ Entre un 5% y un 15% del flujo común

⁹ Menor al 1% de la tensión aplicada

¹⁰ Esto es, cuyo valor no dependa del grado de carga del transformador

capacitivo el flujo común en carga es un poco mayor que en vacío, como se muestra en la figura 3.10¹¹.

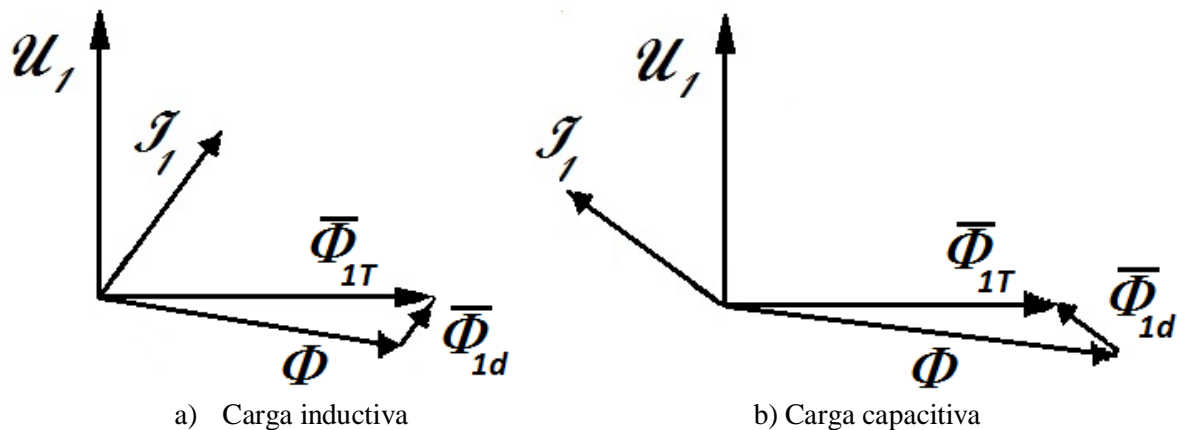


Figura 3.10: Flujo total primario, flujo común y flujo de dispersión primario en caso de carga inductiva (a) y en caso de carga capacitiva (b)

El hecho de que con carga de tipo capacitivo el flujo común sea mayor al que se tiene en vacío hace que las pérdidas en el núcleo también sean algo mayores que en vacío.

Dado que la resta de flujos es una resta fasorial, y teniendo en cuenta el relativamente reducido valor del flujo disperso, en realidad no hay demasiada diferencia entre el valor de cresta de la sinusoide de flujo común y el valor de cresta de la sinusoide de flujo disperso, por tanto, la ecuación (3.39) se puede aplicar también con el flujo común, si bien el error que se comete en este caso es algo mayor.

$$U_1 \approx 4,44 f N_1 \Phi \quad (3.41)$$

3.3. POTENCIA NOMINAL

En un transformador de potencia, las diferentes cargas se conectan al secundario del transformador en paralelo entre sí, de tal manera que reciban la misma tensión. Cuantas más cargas se conecten en paralelo menor será la impedancia vista desde el secundario y mayor será la intensidad que circula por el arrollamiento secundario del transformador y por tanto la intensidad primaria. Podemos plantearnos la pregunta de cuántas cargas podemos conectar en el secundario del transformador, o, de forma más precisa, cual es la máxima corriente que se puede demandar del secundario del transformador.

Como se estudió en el capítulo 2, la vida de un aislamiento depende de la temperatura. Si se desea que un transformador dure muchos años se debe acotar la temperatura de funcionamiento del transformador. La temperatura para la que un fabricante debe diseñar un transformador se denomina temperatura nominal¹² o temperatura asignada.

Para acotar la temperatura de funcionamiento se debe elegir adecuadamente el sistema de refrigeración y se deben acotar las pérdidas de potencia activa en el transformador. Veamos qué se debe hacer para acotar las pérdidas de potencia activa

¹¹ Esta conclusión que se ha obtenido aquí es también aplicable a las máquinas eléctricas que se estudiarán en otra asignatura (máquinas síncronas y asíncronas)

¹² En realidad, la norma IEC 60076-2 (Transformadores de potencia. Parte 2: Calentamiento) define una temperatura nominal diferente en cada parte del transformador (capa superior del aceite, temperatura media del arrollamiento). Así, para el caso de transformadores en aceite con circulación natural o forzada (pero no dirigida) la temperatura media del arrollamiento no debe exceder 105°C (40°C de temperatura ambiente más un calentamiento de 65°K)



a) Pérdidas en el hierro

En un transformador se tienen unas pérdidas en el hierro

$$P_{Fe} = (k_H f B^2 + k_{Fo} f^2 B^2) V_{olFe} \quad (3.42)$$

Pero como la inducción depende de la tensión aplicada, las pérdidas en el hierro dependen del cuadrado de la tensión.

b) Pérdidas en el cobre

Las pérdidas en los arrollamientos dependen de la intensidad

$$P_{cu} = R_1 I_1^2 + R_2 I_2^2 \quad (3.43)$$

Como se muestra en la ecuación (3.36) las dos intensidades están ligadas entre sí.

Si se desea acotar las pérdidas de potencia activa se debe acotar tanto la tensión aplicada como la intensidad consumida, o lo que es lo mismo, la tensión aplicada y la potencia aparente.

$$S_N = U_{1N} I_{1N} \quad (3.45)$$

A esta tensión, intensidad y potencia aparente con las que el transformador alcanza la temperatura especificada en las normas (nacionales, UNE e internacionales, IEC) se le denomina tensión asignada (o nominal), intensidad asignada (o nominal) y potencia asignada (o nominal)¹³.

En un transformador las pérdidas de potencia activa son muy pequeñas, y el consumo de potencia reactiva también lo es, de modo que sin gran error se puede identificar potencia nominal primaria y potencia nominal secundaria

$$S_N = U_{1N} I_{2N} = U_{2N} I_{2N} \quad (3.46)$$

Como es sabido, en electricidad se consideran tres tipos de potencia, la potencia activa, la potencia reactiva y la potencia aparente. Nótese que en un transformador la potencia que se debe acotar es la potencia aparente¹⁴; por tanto la potencia nominal de un transformador se da en kVA (o MVA) y no en kW (o MW).

Para un número de espiras dado, la tensión aplicada a un transformador determina la sección del circuito magnético, ya que la inducción en el núcleo no debe superar la inducción de saturación de las chapas magnéticas.

$$U_{1N} = 4,44 f N_1 B S_{Fe} \quad (3.47)$$

Para una densidad de corriente dada la intensidad que circula por los arrollamientos determina la sección de hilo de cobre

$$S_{Cul} = \frac{I_{1N}}{\delta} \quad (3.48)$$

¹³ En realidad el nombre correcto es tensión asignada, corriente asignada y potencia asignada. El adjetivo nominal está en desuso.

¹⁴ No es preciso argumentar esto, pues las razones han sido expuestas anteriormente.



Por tanto vemos que la potencia aparente está relacionada con el tamaño de un equipo eléctrico en el sentido de que cuanto mayor es la potencia aparente de un transformador más volumen de hierro y de cobre se precisa para construirlo, y por lo tanto mayor es el precio. Sin embargo, no debe pensarse que existe una relación lineal entre la potencia aparente y el volumen de materiales preciso para construir el transformador, ya que el volumen aumenta con el cubo de las dimensiones y la potencia con la cuarta potencia de las dimensiones¹⁵, de modo que cuanto mayor es un transformador menos hierro y cobre se precisan por cada kVA transferido al secundario.

3.4. SOBRECARGAS ADMISIBLES

Lo normal en un transformador es que trabaje con una carga¹⁶ inferior a la nominal.

Se denomina grado de carga al cociente entre la potencia que entrega un transformador en unas condiciones dadas y la potencia nominal

$$k = \frac{S}{S_n} \quad (3.49)$$

La potencia instalada en la red eléctrica de un país aumenta con el paso de los años, y con ella la potencia que se demanda a un transformador de la red.

En algunas circunstancias (en general excepcionales) puede ocurrir que un transformador trabaje en sobrecarga. Esto puede suceder, por ejemplo cuando una línea o transformador se ha desconectado de la red por actuación de las protecciones y la carga que suministraba esa línea debe ser aportada ahora por el transformador sobrecargado. Si el transformador desconectado de la red ha sufrido daños importantes y debe ser enviado a reparar, la sobrecarga puede prolongarse durante bastante tiempo (varias semanas o incluso algunos meses).

Cuando un transformador trabaja en sobrecarga la temperatura del mismo puede superar la temperatura de diseño indicada en la norma UNE 60076-2 (Transformadores de Potencia. Parte 2: Calentamiento de transformadores sumergidos en líquido), es ese caso el transformador envejecerá de forma acelerada, ya que la temperatura acelera las reacciones químicas de despolimerización de los papeles aislantes.

En realidad la temperatura del transformador depende no sólo del grado de carga sino de la temperatura ambiente. Ocurre que la potencia que se le demanda a un transformador no es constante a lo largo de un día (frecuentemente la potencia demandada por la noche es menor) y la temperatura ambiente tampoco lo es (por la noche la temperatura suele ser inferior a la del mediodía), por lo que el envejecimiento de un transformador no es uniforme a lo largo del día.

La norma UNE 60076-7 (Transformadores de potencia. Parte 7: Guía de carga para transformadores sumergidos en aceite) clasifica los ciclos de carga en tres tipos:

- *Carga cíclica normal*: en el ciclo se tienen periodos de sobrecarga (o de temperatura ambiente excesiva) y periodos sin sobrecarga (o con temperatura ambiente más reducida). La pérdida de vida durante los periodos de sobrecarga se ve compensada por la ganancia de vida durante los periodos de baja carga. En este tipo de ciclos no hay un consumo de vida anormal.
- *Carga de emergencia de larga duración*¹⁷: En este tipo de sobrecargas sí que hay una reducción de la vida útil del transformador.

¹⁵ En realidad esta afirmación es cierta si se admite que la tensión y la intensidad dependen del cuadrado de las dimensiones. En la práctica, las tensiones deben ajustarse a unos valores normalizados, por lo que la afirmación no es tan cierta.

¹⁶ En electricidad la palabra *carga* generalmente es sinónimo de potencia.

¹⁷ En realidad la diferencia entre las sobrecargas de larga duración y las de corta duración no es tanto la duración de las mismas como su cuantía. En este sentido el nombre pareciera ser un tanto inapropiado. Lo que pasa es que



- *Carga de emergencia de corta duración*: Cuando ha habido un percance importante en la red, ésta puede quedar dividida en dos partes aisladas, y debido a ello, en los transformadores de una de las partes puede haber una sobrecarga importante. En ese caso se deben desconectar cargas de forma ordenada y realizar maniobras para evitar que los elementos de la red disparen en cascada, pero puede ocurrir que durante un tiempo (en cualquier caso inferior a media hora) uno o varios transformadores sufran sobrecargas muy importantes que reduzcan su vida útil. Este tipo de sobrecargas tan elevadas pueden ser muy perjudiciales para un transformador, por lo que no es deseable que se produzcan más de una o a lo sumo dos veces en la vida del mismo.

Las sobrecargas de larga duración provocan una pérdida de vida del transformador, y por tanto cuánta sobrecarga se puede admitir es un problema de tipo económico, sopesando las ventajas de la sobrecarga (se evitan multas de las comunidades autónomas por pérdida de servicio, reclamaciones de usuarios, posibilidad de diferir una inversión) y los inconvenientes (el envejecimiento acelerado del transformador supone una pérdida económica). La pérdida de vida depende de la temperatura que se alcance en el punto más caliente del transformador (la parte superior de los arrollamientos) y del tiempo durante el cual se mantenga la sobrecarga.

En realidad la temperatura del transformador depende no sólo del grado de carga sino de la temperatura ambiente (por eso no es igual de peligrosa una sobrecarga en invierno que en verano), por lo que para evaluar el envejecimiento se debe disponer de un modelo térmico. Las temperaturas que interesa calcular son la temperatura del punto más caliente (T_{hs}), porque será el punto que más envejezca, y la temperatura de la capa superior del aceite (T_{To}), porque tampoco es deseable que el aceite se degrade en exceso.

En cualquier caso, para sobrecargar un transformador de forma segura se debe disponer de un modelo térmico que estime las temperaturas en el transformador¹⁸ y la pérdida de vida que suponen. La propia norma IEC 60076-7 da dos ecuaciones que constituyen un modelo térmico simplificado. Otros muchos se pueden encontrar en la literatura técnica. Lamentablemente, los modelos simples son incapaces de arrojar predicciones precisas en las diferentes condiciones de carga posibles¹⁹. En ocasiones (especialmente en los transformadores más antiguos) el usuario de un transformador no dispone de información precisa con la que alimentar los modelos. Debido a ello se debe ser conservador a la hora de determinar la cuantía de las sobrecargas admisibles.

El incremento de temperatura en el transformador durante una sobrecarga de larga duración se rige por la constante de tiempo del transformador, que depende de la masa de aceite, de la superficie de refrigeración (radiadores) y de si la circulación de aire es natural o forzada. Para transformadores de distribución de pocos MVA la constante de tiempo está en torno a 3 horas, para transformadores de grandes potencias con circulación natural de aire unas 4 horas y para transformadores con circulación forzada de aire en torno a 1,5 horas.

En caso de sobrecargas de emergencia de corta duración de cuantía muy elevada (por ejemplo 1,5 veces I_N), el flujo disperso aumenta de forma importante²⁰. Este flujo disperso tan elevado puede originar pérdidas parásitas²¹ en elementos estructurales (vigas de apriete, tornillos, cuba, shunts magnéticos). En el caso de que esos elementos estructurales alcancen temperaturas elevadas es posible que produzcan una descomposición local del aceite que haga que se generen burbujas de gas libre en el transformador. Por esa razón, y por el peligro de que el agua embebida en el aislamiento sólido se

una sobrecarga muy intensa sólo se puede admitir durante un tiempo muy breve (sobrecargas de corta duración), mientras que las sobrecargas moderadas se pueden admitir durante tiempos muy prolongados (sobrecargas de larga duración).

¹⁸ Al menos la temperatura de la capa superior del aceite y la temperatura del punto más caliente del arrollamiento

¹⁹ Un error en la previsión de apenas un grado puede suponer una diferencia en el consumo de vida importante

²⁰ Recuérdese que el flujo disperso es proporcional a la corriente por los arrollamientos

²¹ Pérdidas por histéresis y por corrientes de Foucault



vaporice, se limita la cuantía de las sobrecargas (incluso en emergencias) a 1,5 veces la corriente nominal.

Cuando se produce un incremento de carga muy importante en un espacio de tiempo muy reducido (como ocurre en las sobrecargas de corta duración), en los primeros instantes de tiempo hay una elevación de temperatura de los conductores sobre el aceite que lo rodea (que tiene mucha mayor inercia térmica). Por eso, en este caso la constante de tiempo que debe tenerse en cuenta es la constante de tiempo del arrollamiento (del orden de pocos minutos).

En el caso de sobrecargas de emergencia de corta duración, la cuantía de la sobrecarga admisible depende del grado de carga previo a la sobrecarga, ya que no es lo mismo una sobrecarga que se aplica a un transformador que trabaja a su temperatura asignada que la misma sobrecarga aplicada a un transformador que trabaja relativamente frío.

La norma IEC 60076-7 especifica las temperaturas que no se deben sobrepasar en las diferentes partes de un transformador durante los diferentes ciclos de carga mencionados (carga cíclica normal, sobrecargas de emergencia de corta duración y sobrecargas de emergencia de larga duración), así como las corrientes máximas admisibles. Por encima de las temperaturas indicadas en la norma se debe desconectar al transformador de la red ante el peligro de un fallo inminente del mismo.

En caso de sobrecargas severas (muy prolongadas o de mucha cuantía) conviene aumentar la frecuencia de realización de análisis de gases disueltos en el transformador.

3.5. CIRCUITO EQUIVALENTE

Como se vio en el apartado 3.3., las ecuaciones de un transformador en carga son

$$\bar{U}_1 = R_1 \bar{I}_1 + j\omega L_{d1} \bar{I}_1 + \bar{E}_1 \quad (3.50)$$

$$\bar{E}_1 = j\omega N_1 \bar{\Phi} \quad (3.51)$$

$$\bar{E}_2 = j\omega N_2 \bar{\Phi} \quad (3.52)$$

$$\bar{U}_2 = \bar{E}_2 - R_2 \bar{I}_2 - j\omega L_{d2} \bar{I}_2 \quad (3.53)$$

$$\bar{U}_2 = \bar{Z}_L \bar{I}_2 \quad (3.54)$$

$$\bar{I}_1 = \bar{I}_0 + \frac{N_2}{N_1} \bar{I}_2 \quad (3.55)$$

Disponer de tantas ecuaciones para estudiar un solo transformador es algo bastante farragoso, habida cuenta de que en una red hay una gran cantidad de transformadores, además, en el sistema de ecuaciones anterior aparecen algunas variables (por ejemplo el flujo o las f.e.m.) cuyo conocimiento no es de interés para un usuario de un transformador. Para eliminar esas variables se tiene en cuenta que, según la ecuación (3.11)

$$E_1 = r_t E_2 \quad (3.56)$$

De modo que de la ecuación (3.53) se despeja E_2 , y se multiplican ambos lados del igual por la relación de transformación (ecuación 3.11). El resultado se introduce en (3.50) y resulta

$$\bar{U}_1 = R_1 \bar{I}_1 + jX_{d1} \bar{I}_1 + R_2 r_t \bar{I}_2 + jX_{2d} r_t \bar{I}_2 + r_t \bar{U}_2 \quad (3.57)$$

Esta ecuación puede plasmarse en forma de un circuito eléctrico, como se muestra en la figura 3.11, con la ventaja de la plasticidad que ello aporta. Para tener en cuenta el hecho de que las corrientes I_1 e I_2/r_t no son idénticas se recurre a situar una rama en derivación entre primario y secundario por la que circule la corriente de vacío I_0 .

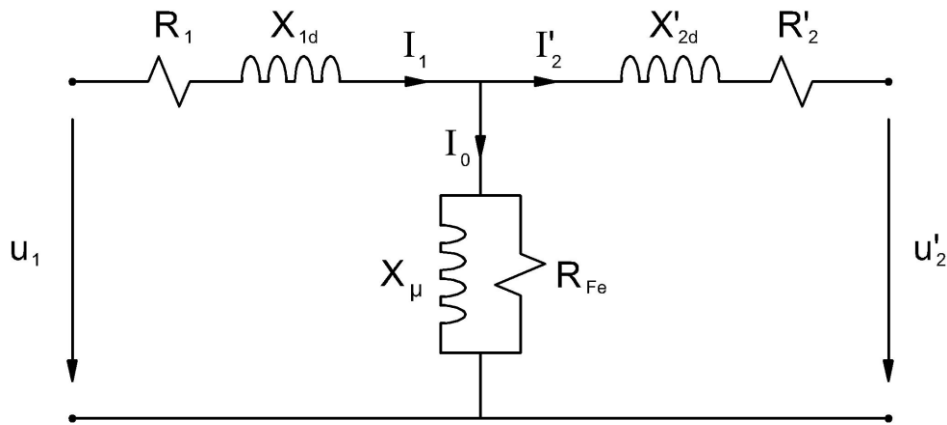


Figura 3.11: circuito equivalente exacto del transformador

Los elementos de esta rama en derivación son una resistencia (resistencia de pérdidas en el hierro) y una reactancia (reactancia magnetizante) que se disponen habitualmente en paralelo entre sí, ya que como se indicó las pérdidas en el hierro y la corriente precisa para crear el flujo común dependen de la tensión aplicada.

Los valores con superíndice prima de la figura anterior son las magnitudes referidas a primario:

$$I'_2 = \frac{I_2}{r_t} \quad (3.58)$$

$$U'_2 = U_2 r_t \quad (3.59)$$

$$R'_2 = R_2 r_t^2; \quad X'_{2d} = X_{2d} r_t^2; \quad Z'_L = Z_L r_t^2 \quad (3.60)$$

Nótese que en el nuevo circuito los balances de potencia (tanto activa como reactiva o aparente) se conservan, ya que, por ejemplo

$$P_{cu,2} = R_2 I_2^2 = r_t^2 R_2 \frac{I_2^2}{r_t^2} = R'_2 I_2'^2 \quad (3.61)$$

Al conservarse las potencias, el factor de potencia ($\cos \varphi$) se conserva.

El circuito de la figura 3.11 es incómodo de utilizar, por lo que es habitual pasar la rama derivación a primer término (figura 3.12), con lo que la corriente consumida por la misma no depende del grado de carga del transformador.

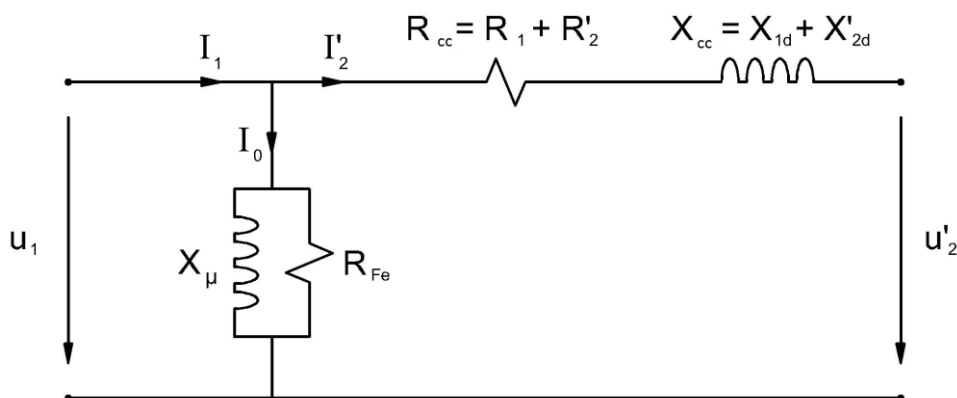


Figura 3.12: Circuito equivalente aproximado

En el circuito de la figura 3.12 la reactancia de la rama serie (denominada reactancia de cortocircuito) es la suma de la reactancia de dispersión primaria más la reactancia de dispersión del arrollamiento secundario reducida al primario. Algo semejante ocurre con la resistencia de la rama serie (resistencia de cortocircuito), que es la suma de la resistencia del arrollamiento primario más la del secundario reducida al primario. Las resistencias de los arrollamientos son las resistencias en corriente alterna, que incluyen efectos tales como el desplazamiento de corriente en los conductores debido al flujo de dispersión²². La impedancia de cortocircuito es la suma compleja de la resistencia de cortocircuito y la reactancia de cortocircuito.

$$Z_{cc} = \sqrt{R_{cc}^2 + X_{cc}^2} \quad (3.62)$$

La corriente consumida por la rama derivación es inferior a un 1% de la corriente nominal, de modo que frecuentemente esa rama se desprecia, quedando el circuito como se muestra en la figura 3.13.

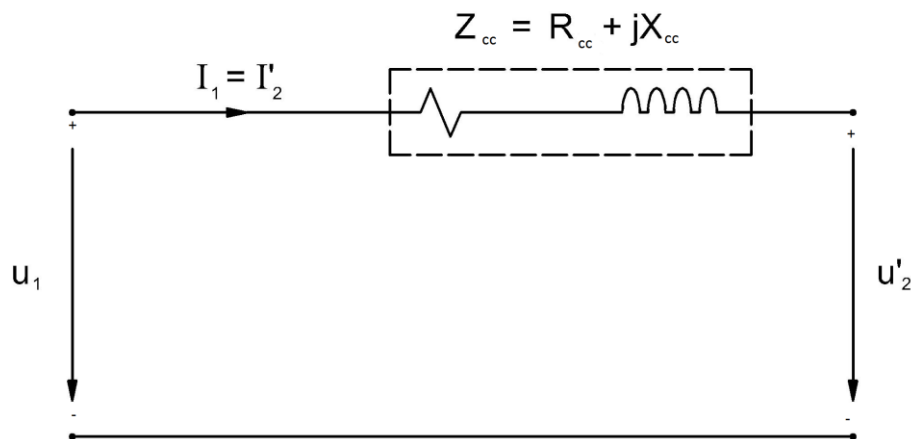


Figura 3.13: Circuito equivalente simplificado

Para estudios de red, es frecuente expresar las tensiones, intensidades, potencias e impedancias como múltiplo de una tensión base (habitualmente la nominal), una intensidad base, una potencia base (habitualmente la nominal del transformador, aunque no siempre) y una impedancia base.

$$u_1 = \frac{U_1}{U_{1N}} \quad (3.63)$$

$$i_1 = \frac{I_1}{I_{1N}} \quad (3.64)$$

$$\varepsilon_{Rcc} = \frac{R_{cc}}{Z_b} 100 = \frac{R_{cc}}{U_{1N}} 100 = \frac{R_{cc} I_{1N}}{U_{1N}} 100 \quad (3.65)$$

Una de las ventajas de expresar la impedancia en porcentaje (o en por unidad) es que las impedancias así expresadas proporcionan más información. Por ejemplo, la resistencia de cortocircuito porcentual informa sobre las pérdidas en el cobre del transformador (y de esta forma proporciona una información indirecta sobre el rendimiento).

²² Este aspecto se describe mejor en la memoria de la práctica 3.



$$\varepsilon_{Rcc} = \frac{R_{cc}}{Z_b} 100 = \frac{R_{cc}}{\frac{U_{1N}}{I_{1N}}} 100 = \frac{R_{cc} I_{1N}^2}{S_N} 100 \quad (3.66 \text{ a})$$

$$\varepsilon_{Rcc} = \frac{P_{cc}}{S_N} 100 \quad (3.66 \text{ b})$$

De igual forma, la impedancia de cortocircuito porcentual es

$$\varepsilon_{cc} = \frac{Z_{cc}}{Z_b} 100 = \frac{Z_{cc} S_n}{U_{1N}^2} \quad (3.67)$$

Esta impedancia de cortocircuito expresada en % es llamada habitualmente tensión de cortocircuito porcentual porque como se verá en prácticas de laboratorio coincide con la tensión (expresada en porcentaje) que hay que aplicar en el ensayo de cortocircuito para que circule la intensidad nominal por el transformador.

El circuito equivalente que se acaba de obtener se puede usar en un gran número de cálculos y razonamientos que cabe hacer en transformadores. Como ejemplo, en los apartados 3.6 a 3.9 se analizan algunos aspectos para los que cabe utilizar el circuito equivalente. Sin embargo, no se debe olvidar que la inductancia magnetizante que aparece en el circuito equivalente no es constante, con lo que no es útil para todos aquellos razonamientos o análisis en los que interviene el comportamiento del núcleo del transformador. Ejemplos de esto último son razonamientos sobre qué ocurre con la corriente magnetizante o con las pérdidas cuando varía la tensión aplicada al transformador. Otro ejemplo es el estudio de la corriente de conexión del transformador que se realizará en el apartado 3.10.

El circuito equivalente hasta aquí analizado sólo es válido para análisis en baja frecuencia (50 Hz) y no se puede utilizar para el análisis de transitorios como los que se tratan en el apartado 3.10.

3.6. CAÍDA DE TENSIÓN EN UN TRANSFORMADOR

Se denomina caída de tensión en un transformador a la diferencia entre el valor eficaz de la tensión en vacío y el valor eficaz de la tensión en carga. Frecuentemente se expresa en porcentaje referido a la tensión en vacío del transformador

$$\Delta u(\%) = \frac{U_{20} - U_2}{U_{20}} 100 \quad (3.68)$$

Donde $\Delta u(\%)$ es la caída de tensión expresada en porcentaje

U_{20} es la tensión secundaria en vacío

U_2 es la tensión en bornas del secundario en carga

La caída de tensión así definida no coincide con el mero producto de $Z_{cc} I_2'$, ya que cuando se trabaja con números complejos la diferencia de los módulos no es igual al módulo de la diferencia.

En esta asignatura el cálculo de las caídas de tensión en un transformador se realizará por aplicación de las leyes de la teoría de circuitos, aunque en la práctica real de la ingeniería esto es impensable ya que es más farragoso que el procedimiento que se expondrá en este apartado.



La expresión habitualmente utilizada para el cálculo de las caídas de tensión en un transformador es

$$\Delta u(\%) = k \varepsilon_{cc} \cos(\varphi_{cc} - \varphi) \quad (3.69)$$

$\cos\varphi$ es el factor de potencia de la carga conectada al transformador

k es el grado de carga

ε_{cc} es la impedancia de cortocircuito porcentual

y φ_{cc} es

$$\varphi_{cc} = \arctg \frac{X_{cc}}{R_{cc}} \quad (3.70)$$

La expresión (3.69) es una expresión aproximada y su demostración se puede encontrar en cualquier libro de transformadores.

De la expresión de la caída de tensión en un transformador (3.69) se desprende que ésta depende de:

- El grado de carga k
- El factor de potencia de la carga φ
- La impedancia interna del transformador ε_{cc}

Veamos la influencia de esos tres factores:

Las cargas de tipo resistivo y las cargas de tipo inductivo hacen que la tensión en bornas del transformador sea menor en carga que en vacío (figura 3.14). Cuanto más reducido sea el factor de potencia mayor será la caída de tensión. De la figura se desprende que con cargas resistivas e inductivas tensión de salida del transformador disminuye al aumentar el grado de carga.

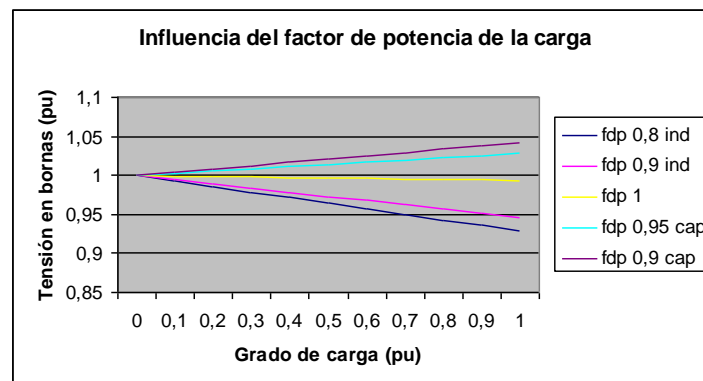


Figura 3.14: Tensión en bornas del transformador en función del grado de carga y del factor de potencia

Por el contrario, con cargas de tipo capacitivo la tensión en bornas del secundario puede ser superior a la que se tiene en vacío. Este efecto se conoce como *efecto Ferranti* y es una consecuencia del hecho de que el flujo en el núcleo de un transformador es superior con carga capacitiva que en vacío. Evidentemente, para un usuario recibir una tensión superior a la nominal es algo no deseable; por ello las cargas capacitivas deben evitarse en los transformadores. De la misma manera, cuando un transformador trabaja con carga capacitiva deben evitarse las sobrecargas.

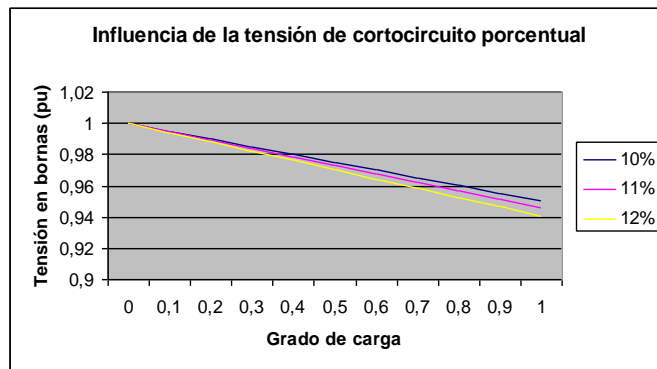


Figura 3.15: Tensión en bornas del transformador en función del grado de carga y de la impedancia del transformador

Por lo que se refiere a la impedancia interna del transformador, en un transformador ideal (sin resistencia y sin flujo de dispersión) no habría caídas de tensión. Cuanto mayor sea la impedancia interna mayores serán las caídas de tensión (figura 3.15). Por tanto, los transformadores de reducida impedancia de cortocircuito tienen la ventaja de tener unas menores caídas de tensión. Como se verá en el tema 4 los transformadores disponen de cambiadores de tomas para compensar las caídas internas de tensión. Evidentemente, si las caídas internas de tensión son muy elevadas el cambiador de tomas en carga debe estar diseñado para un mayor recorrido de tomas, por el contrario, si la impedancia interna del transformador es reducida el mecanismo de regulación de tensión del transformador actuará menos frecuentemente.

3.7. RENDIMIENTO DE UN TRANSFORMADOR

El rendimiento de un transformador es el cociente entre la potencia entregada a la carga y la potencia consumida de la red.

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} 100 \quad (3.71)$$

El rendimiento de un transformador es muy elevado, superior al 90%. Cuanto mayor es un transformador mejor es su rendimiento. Esto es debido a que si un transformador se diseña con una inducción dada y con una densidad de corriente dada la potencia nominal aumenta con la cuarta potencia de sus dimensiones mientras que las pérdidas de potencia activa dependen del cubo de las dimensiones

En efecto, si se mantiene la inducción y la densidad de corriente la tensión y la intensidad nominal crecen con el cuadrado de las dimensiones

$$I = \delta s_{cu} \quad (3.72)$$

$$U = 4,44 fNB s_{Fe} \quad (3.73)$$

Con lo que la potencia nominal crece con la cuarta potencia de las dimensiones.

$$S_N = (4,44 fNB \delta) s_{cu} s_{Fe} \quad (3.74)$$

Mientras que las pérdidas aumentan con la tercera potencia de las dimensiones

$$P_{Fe} = (k_H fB^2 + k_{Fo} f^2 B^2) V_{olFe} \quad (3.75)$$

$$P_{cu} = RI^2 = \rho \frac{l_{cu}}{S_{cu}} (\delta s_{cu})^2 = \rho \delta^2 V_{olCu} \quad (3.76)$$



Por tanto el rendimiento aumenta. De esta manera, en transformadores pequeños (algunos kVA) el rendimiento puede ser del 97% pero en transformadores grandes (MVA) el rendimiento puede ser de un 99.8 %.

La expresión utilizada para el cálculo del rendimiento es la siguiente:

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} \cdot 100 = \frac{U_2 \cdot I_2 \cdot \cos \varphi_c}{U_2 \cdot I_2 \cdot \cos \varphi_c + P_{Fe} + P_{cu}} 100 \quad (3.77)$$

El grado de carga del transformador se puede expresar en función de la potencia o en función de las intensidades

$$k = \frac{S_c}{S_N} = \frac{U_2 \cdot I_2}{U_{2o} \cdot I_{2N}} \approx \frac{I_2}{I_{2N}} \approx \frac{I_1}{I_{1N}} \quad (3.78)$$

Las pérdidas en el cobre dependen del grado de carga del transformador

$$P_{cu} = R_{cc} I_1^2 \rightarrow P_{cc} = R_{cc} I_{1N}^2 \rightarrow P_{cu} = P_{cc} \left(\frac{I_1}{I_{1N}} \right)^2 = k^2 P_{cc} \quad (3.79)$$

Con lo que el rendimiento se puede poner como

$$\eta = \frac{U_2 \cdot I_2 \cdot \cos \varphi_c}{U_2 \cdot I_2 \cdot \cos \varphi_c + P_{Fe} + P_{cu}} 100 = \frac{k \cdot S_N \cdot \cos \varphi_c}{k \cdot S_N \cdot \cos \varphi_c + P_{Fe} + k^2 P_{cc}} 100 \quad (3.80)$$

El rendimiento de un transformador depende de parámetros de diseño (inducción de diseño, densidad de corriente de diseño) y de las condiciones de explotación. Las condiciones de explotación que influyen en el rendimiento son: el grado de carga y el factor de potencia de la carga

Influencia del grado de carga (k):

En un transformador en vacío el rendimiento es cero. Al entrar el transformador en carga el rendimiento va aumentando rápidamente hasta alcanzar un valor máximo para aquel grado de carga en el que las pérdidas fijas (pérdidas en el hierro) se igualan a las pérdidas variables (pérdidas en el cobre)²³. De esta manera, el grado de carga de máximo rendimiento es

$$k_{\eta_{\max}} = \sqrt{\frac{P_{Fe}}{P_{cc}}} \quad (3.81)$$

A partir de ese grado de carga el rendimiento cae suavemente. La figura 3.16 muestra la evolución del rendimiento de un transformador en función del grado de carga.

²³ Esto es algo común a todas las máquinas eléctricas. En el caso de máquinas eléctricas rotativas las pérdidas fijas (o pérdidas independientes de la carga) son las pérdidas en el hierro y las pérdidas por rozamiento

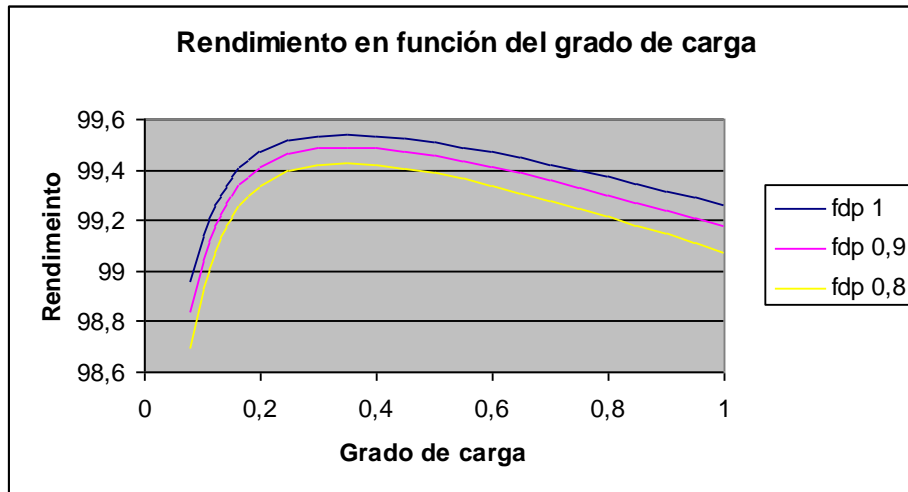


Figura 3.16: Rendimiento de un transformador en función del grado de carga y del factor de potencia de la carga

Factor de Potencia:

Como se muestra en la figura 3.16, el rendimiento de un transformador aumenta al aumentar el factor de potencia (fdp), el máximo rendimiento se obtiene con un factor de potencia unidad.

3.8. REPARTO DE CARGA ENTRE TRANSFORMADORES EN PARALELO.

En ocasiones una carga, o una instalación es atendida por dos o más transformadores trabajando en paralelo (figura 3.17). Algunas de las razones por las que se puede llegar a esta situación son:

- La potencia de la instalación ha ido creciendo a lo largo de los años, y llegado un momento se decidió poner un segundo transformador para no sobrecargar el primero.
- Tener una cierta capacidad de reserva ante la eventualidad de que uno de los transformadores falle

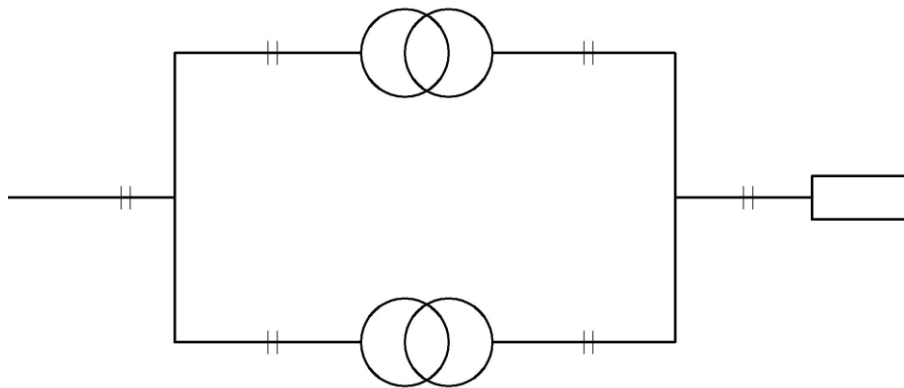


Figura 3.17: conexión en paralelo de transformadores

La primera pregunta que debemos responder es qué condiciones deben cumplir dos transformadores para que trabajen correctamente en paralelo.

La primera condición para que dos transformadores se puedan conectar a la misma red de alimentación es que las tensiones nominales de los arrollamientos primarios sean idénticas, ya que si no es así o bien uno de los transformadores tiene aplicada más tensión que la nominal o bien tiene aplicada menos tensión que la nominal. En el primer caso la corriente de vacío aumenta de forma alarmante al entrar el transformador en saturación, y las pérdidas en el hierro también. En el segundo caso el transformador quedaría infrautilizado.



Para poder unir entre sí los secundarios de los transformadores, las tensiones secundarias tienen que ser idénticas, ya que en caso contrario se tendría una corriente de circulación entre los dos transformadores que haría que el transformador tenga unas pérdidas en el cobre significativas incluso en vacío. Cuando el transformador entre en carga esta corriente de circulación se sumará a la corriente de carga, limitando la carga máxima admisible si el calentamiento es excesivo.

Cuando se conecta a los transformadores una carga, es deseable que la carga se reparta entre los dos transformadores proporcionalmente a su potencia, esto es, que el grado de carga sea el mismo en ambos, pues si no fuera así, cuando se aplique al transformador una carga de potencia igual a la suma de las potencias nominales de los transformadores uno quedaría sobrecargado y otro infrautilizado. La pregunta es ¿cómo se puede conseguir que la carga se reparta de forma proporcional a la potencia nominal? Para responder a esta pregunta utilizaremos el circuito equivalente de los dos transformadores en paralelo (figura 3.19). En este circuito se cumple

$$Z_{cc1}I_1 = Z_{cc2}I_2 \tag{3.82}$$

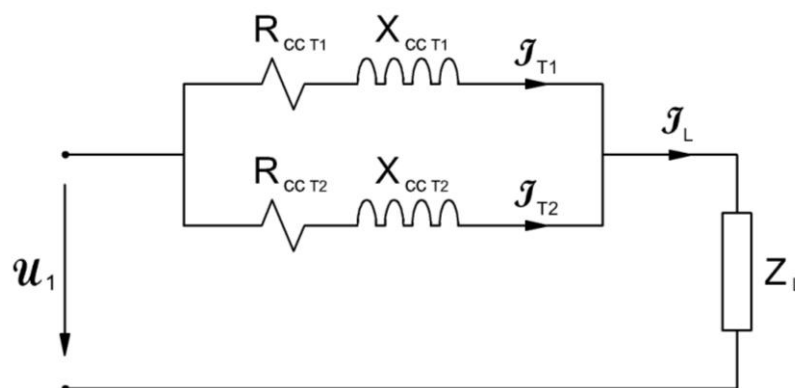


Figura 3.19: Funcionamiento en paralelo de transformadores

La ecuación puede ser transformada de la forma

$$\frac{Z_{cc1}I_1}{U_{1N}} 100 \frac{I_{NT1}}{I_{NT1}} = \frac{Z_{cc2}I_2}{U_{1N}} 100 \frac{I_{NT2}}{I_{NT2}} \tag{3.83}$$

Con lo que queda

$$\epsilon_{cc1}k_1 = \epsilon_{cc2}k_2 \tag{3.84}$$

Donde k_1 y k_2 son los grados de carga de los dos transformadores.

Si queremos que los grados de carga de ambos transformadores sean idénticos ($k_1=k_2$) se debe cumplir

$$\epsilon_{cc1} = \epsilon_{cc2} \tag{3.83}$$

Esto es, las tensiones de cortocircuito porcentuales deben ser iguales. En la práctica, la norma IEC 60076-1 permite una cierta tolerancia (un 10%) entre la tensión de cortocircuito porcentual de un transformador respecto del valor declarado en la placa de características. Esto, como se verá, va a dar lugar a una nueva restricción.

Supongamos que conectamos en paralelo dos transformadores T1 y T2 que aparentemente tienen la misma tensión de cortocircuito porcentual, pero en realidad el primero de ellos tiene un tensión de cortocircuito un 10% menor a la declarada, mientras el segundo de ellos tiene una tensión de



cortocircuito un 10% superior a la declarada. ¿cómo se repartiría la carga entre ellos? Las ecuaciones que determinan el funcionamiento de este conjunto son²⁴

$$S_c = S_{T1} + S_{T2} \quad (3.84)$$

$$\varepsilon_{cc1} k_1 = \varepsilon_{cc2} k_2 \quad (3.85)$$

Ahora bien, como

$$\varepsilon_{cc1} = 0,9\varepsilon_{cc} \quad (3.86)$$

$$\varepsilon_{cc2} = 1,1\varepsilon_{cc}$$

Los grados de carga no son idénticos sino que el transformador 1 queda más cargado que el 2

$$k_1 = k_2 \frac{\varepsilon_{cc2}}{\varepsilon_{cc1}} = k_2 \frac{1,1\varepsilon_{cc}}{0,9\varepsilon_{cc}} = 1,22k_2 \quad (3.87)$$

¿es esto importante? Para responder a esta pregunta, vamos a ver cuál será la máxima potencia que puede entregar el conjunto de estos dos transformadores en paralelo. La máxima potencia se dará cuando uno de los dos transformadores tenga un grado de carga 1, en este caso, el primer transformador en sobrecargarse será el transformador 1. En tal caso la carga del transformador 2 será 0,82. ¿cuál será la potencia que entregarán a la carga en estas circunstancias?

$$S_c = S_{T1} + S_{T2} \rightarrow S_{NT1} + 0,82S_{NT2} = S_{cmax} \quad (3.88)$$

Imaginémonos que el transformador 1 tiene una potencia S_N y el transformador 2 una potencia $2S_N$, la potencia máxima que los transformadores pueden entregar a la carga es

$$S_N + 0,82 \cdot 2S_N = 2,64S_N \quad (3.89)$$

Sin embargo, si la potencia del transformador 1 es S_N y la del transformador 2 es $6S_N$, la potencia máxima que los transformadores pueden entregar a la carga es

$$S_N + 0,82 \cdot 6S_N = 5,92S_N \quad (3.90)$$

Esto es, la potencia máxima que pueden entregar entre los dos transformadores sin que ninguno se sobrecargue es menor a la potencia nominal del transformador 2. Esta situación absurda nos muestra que no es recomendable poner en paralelo transformadores con potencias nominales muy discrepantes. De hecho, la norma UNE 207005 recomienda que la potencia de los transformadores que se conectan en paralelo no exceda de 2:1.

3.9. ACCIDENTE DE CORTOCIRCUITO

Cuando un transformador por accidente sufre un cortocircuito en bornas (figura 3.20) se establece por sus arrollamientos una corriente varias veces superior a su corriente nominal. El estudio del funcionamiento de un transformador cuando en el secundario del mismo ocurre un cortocircuito accidental es de interés tanto para el fabricante de un transformador como para el usuario del mismo. Para el fabricante del transformador porque debe diseñarlo para soportar los efectos del cortocircuito

²⁴ En realidad la ecuación (3.84) no estrictamente cierta, pues las potencias aparentes proporcionadas por cada uno de los transformadores son números complejos que se deben sumar fasorialmente, no obstante, los ángulos de fase de las impedancias internas de los dos transformadores no suelen diferir demasiado, y en estas circunstancias la suma de módulos expresada en (3.84) es aproximadamente cierta. A pesar de lo aquí dicho, en los problemas de la asignatura no está permitido suponer que las potencias proporcionadas por los dos transformadores tienen idéntico ángulo de fase.

desde que se produce hasta el tiempo que tardan las protecciones en despejarlo. Para el usuario porque debe elegir el tiempo de actuación de las protecciones y dimensionar los diferentes elementos de la instalación (conductores, interruptores, seccionadores, transformadores de intensidad, etc) ya que la intensidad de cortocircuito atraviesa todos los elementos que están en serie con el transformador, con lo que todos esos elementos van a sufrir unos sobreesfuerzos que deben poder soportar hasta que actúen las protecciones. De hecho, la norma IEC 60076 parte 5 indica que un transformador debe poder soportar los efectos térmicos y dinámicos de un cortocircuito al menos durante 2s, que es un tiempo sobradamente superior al requerido para que las protecciones actúen. Evidentemente, si el transformador no cumple la normativa, el cliente puede pedir modificaciones en el diseño del mismo.

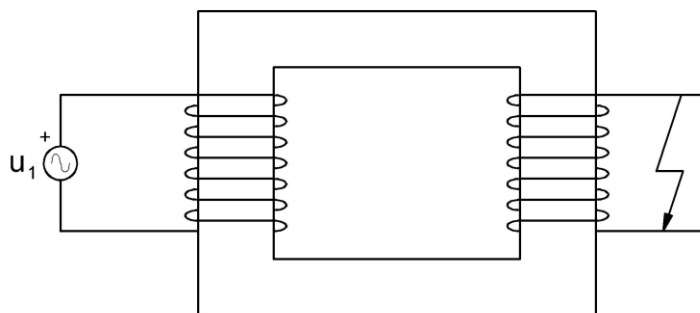


Figura 3.20: Accidente de cortocircuito en un transformador

Cuando se cambian repentinamente las condiciones de operación de un circuito eléctrico en la respuesta del circuito se pueden distinguir dos períodos: un primer período transitorio que dura unos pocos ciclos y un período permanente (figura 3.21). La mayor intensidad de la corriente corresponde al régimen transitorio.

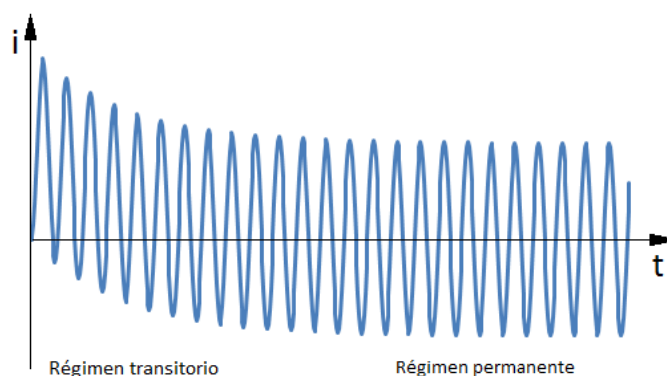


Figura 3.21: Corriente de cortocircuito en régimen transitorio

La corriente de cortocircuito produce dos tipos de esfuerzos en un transformador: esfuerzos térmicos y esfuerzos dinámicos. Los esfuerzos térmicos se refieren al incremento de temperatura debido al calor generado por las pérdidas producidas por la corriente de cortocircuito

$$Q = 0,24R_{cc} I^2 t \tag{3.91}$$

Estas pérdidas dependen del valor eficaz de la corriente. Para su cálculo se suelen despreciar el régimen transitorio, porque si bien es muy virulento, como ya se señaló, también es muy reducido, de modo que el calor generado en ese período no suele ser relevante.

Además de los esfuerzos térmicos, la corriente de cortocircuito produce esfuerzos dinámicos. Los esfuerzos dinámicos se refieren a fuerzas de repulsión entre arrollamientos. Como es sabido, dos hilos por los que circula una corriente experimentan unas fuerzas

$$\vec{F} = I(\vec{l} \times \vec{B}) \quad (3.92)$$

estas fuerzas serán de atracción si las corrientes son de idéntico signo y serán de repulsión en caso contrario. De la misma manera, dos arrollamientos por los que circulan corrientes experimentan fuerzas que serán de repulsión, ya que los amperios-vuelta del secundario son antagonistas respecto de los amperios-vuelta primarios.

Dado que las fuerzas se obtienen de un producto vectorial, la dirección de las fuerzas será perpendicular a la de la inducción. En un solenoide infinito la inducción tiene sentido axial, por lo que las fuerzas son radiales (de compresión en el arrollamiento interno y de expansión en el externo). No obstante un arrollamiento tiene una altura finita, por lo que en los extremos del arrollamiento las líneas de inducción ya no tienen dirección puramente axial. Eso hace que aparezcan fuerzas axiales sobre el arrollamiento.

Las fuerzas entre arrollamientos son debidas que cada uno de los arrollamientos se encuentra inmerso en el flujo de dispersión del otro, siendo este flujo disperso proporcional a la corriente que lo crea.

$$\Phi_{d1} = kI_{cc} \quad (3.93)$$

Por tanto, las fuerzas de repulsión dependerán del cuadrado de la corriente que circula.

A diferencia de lo que ocurre con la transmisión de calor, que es un fenómeno que se rige por una constante de tiempo muy lenta, los esfuerzos de repulsión son instantáneos. Por ello los máximos esfuerzos de repulsión se tienen cuando la corriente es máxima, y como se ha indicado la corriente es máxima en el período transitorio.

De lo visto, se desprende que para diseñar el transformador (o la instalación, según el caso) para que soporte los esfuerzos de cortocircuito es preciso estudiar tanto el régimen transitorio como el régimen permanente. Empezaremos por éste último.

Estudio del régimen permanente

La corriente de cortocircuito en régimen permanente (figura 3.22) vale

$$I_{cc} = \frac{U_{1N}}{Z_{cc}} \quad (3.94)$$

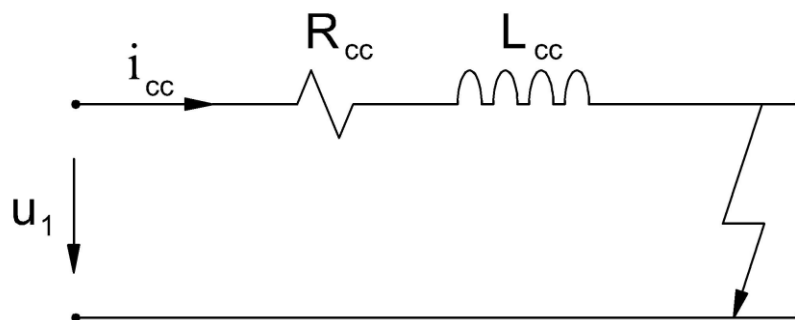


Figura 3.22: Circuito para el estudio del accidente de cortocircuito en un transformador

Si multiplicamos y dividimos esta expresión por la intensidad nominal resulta

$$I_{cc} = \frac{U_{1N}}{Z_{cc}} \frac{I_{1N}}{I_{1N}} \frac{100}{100} = \frac{I_{1N}}{\epsilon_{CC}} 100 \quad (3.95)$$



Como se puede ver, la corriente de cortocircuito depende de la impedancia de cortocircuito porcentual y de la corriente nominal.

Vemos que una elevada impedancia de cortocircuito es buena para que las corrientes de cortocircuito sean pequeñas, pero es mala porque como hemos visto influye en las caídas de tensión y si el transformador tiene muchas caídas de tensión hay que fabricar el cambiador de tomas en carga para que tenga un gran recorrido de regulación (ver tema 4). ¿Qué hacemos, construimos el transformador con una impedancia de cortocircuito grande o pequeña?

Como se deduce de las ecuaciones (3.91), (3.92), (3.93) y (3.95), los esfuerzos de cortocircuito (térmicos y dinámicos) dependen del cuadrado de la corriente. El cuadrado de un número grande es muy grande. Por eso en los transformadores de grandes potencias los esfuerzos de cortocircuito son muy elevados y puede ser muy complicado hacer que el transformador sea capaz de soportarlos. Por eso, en los transformadores grandes se construyen con impedancias de cortocircuito porcentuales muy grandes. La impedancia de cortocircuito es la raíz cuadrada de la resistencia de cortocircuito al cuadrado más la reactancia de cortocircuito al cuadrado. La resistencia de cortocircuito nos habla de las pérdidas en el cobre del transformador y por tanto del rendimiento. En transformadores grandes interesa un gran rendimiento y por tanto una resistencia de cortocircuito reducida ¿cómo conseguimos que la impedancia sea grande a pesar de que la resistencia es pequeña? Jugando con el flujo disperso.

Transitorio de cortocircuito

Para estudiar el régimen transitorio de cortocircuito, la ecuación que debemos resolver es

$$u_1 = R_{cc} i_{cc} + L_{cc} \frac{di_{cc}}{dt} \quad (3.96)$$

Como la ecuación (3.96) es un poco complicada de resolver, la simplificaremos despreciando el primer sumando. De esta manera podemos obtener las conclusiones fundamentales sin gran esfuerzo

$$u_1 = L_{cc} \frac{di_{cc}}{dt} \quad (3.97)$$

Despejando en esta ecuación la derivada de la corriente, se deduce que la derivada de la corriente viene impuesta por la tensión aplicada

$$\frac{di_{cc}}{dt} = \frac{u_1}{L_{cc}} \quad (3.98)$$

Ocurre que la tensión es una senoide y el cortocircuito puede producirse en cualquier momento de la senoide.

El cortocircuito más suave se da cuando la tensión pasa por su máximo (figura 3.23 a), pues entonces la corriente crece sólo durante el primer cuarto de período (en el cual la tensión es positiva, y con ella la derivada de la corriente) y disminuye al cuarto de período restante. El valor de cresta de la corriente es el mismo que el de régimen permanente, esto es, no hay régimen transitorio.

El peor caso es cuando la tensión de red pasa por cero (figura 3.23b), porque si ocurre eso, la tensión es positiva durante 10 ms (y con ella la derivada de la corriente), con lo cual la corriente crece durante todo ese tiempo (la derivada es positiva) y puede llegar a valer el doble del valor de cresta de régimen permanente.

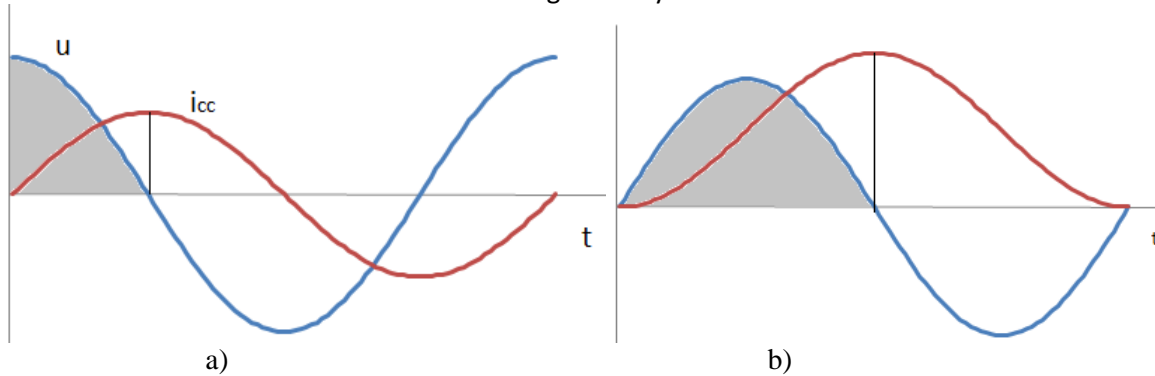


Figura 3.23: Transitorio de cortocircuito despreciando la caída de tensión en la resistencia de los arrollamientos
 a) Caso de que la tensión pase por un máximo en el instante de cortocircuito b) Caso de que la tensión pase por cero

En realidad los arrollamientos tienen una resistencia no nula y por tanto el transitorio se amortigua. Este régimen amortiguado se rige por la constante de tiempo de cortocircuito

$$\tau_{cc} = \frac{R_{cc}}{L_{cc}} \tag{3.99}$$

Por eso la primera cresta del régimen transitorio no es el doble de la que se tiene en régimen permanente sino un poco menor

$$I_{ccT\max} = k\sqrt{2}I_{cc} \tag{3.100}$$

La norma UNE 60076 parte 5 proporciona el valor de $k\sqrt{2}$ en función del cociente R/L , donde R es la resistencia del sistema (suma de la resistencia de la red más la resistencia de cortocircuito del transformador) y X es la reactancia del sistema (ídem) (ver tabla I).

Tabla I: Valores del factor $k\sqrt{2}$ en función del cociente entre la reactancia del sistema y la resistencia del sistema

X/R	1	2	3	4	5	6	7	8	10	14
$k\sqrt{2}$	1,51	1,64	1,76	1,95	2,09	2,19	2,27	2,38	2,46	2,55

NOTA: Para valores de X/R diferentes de los indicados se debe interpolar entre valores contiguos

3.10. CORRIENTE DE CONEXIÓN DE UN TRANSFORMADOR (INRUSH CURRENT)

Al conectar un transformador a la red se produce un transitorio que puede involucrar una corriente varias veces superior a la corriente asignada del transformador.

Para comprender el fenómeno imagínese que se tiene un transformador desconectado de la red en el cual el flujo es nulo y en un momento dado se cierra el interruptor que conecta el primario del transformador a la red.

A partir del momento de conexión se verifica

$$u_1 = N_1 \frac{d\phi}{dt} \tag{3.101}$$

Con lo que la derivada del flujo depende del valor de la tensión.

Por tanto, como en el caso del apartado precedente, el transitorio puede ser más o menos violento dependiendo del valor de la tensión. Si la tensión pasa por un máximo en el momento del cierre del

interruptor el flujo crece durante un cuarto de período y llega a alcanzar un valor de cresta idéntico al que se tiene en funcionamiento normal.

$$\phi = \frac{1}{N_1} \int_0^t \sqrt{2}U_1 \cos \omega t \cdot dt = \frac{\sqrt{2}U_1}{\omega N_1} \text{sen } \omega t \quad (3.102)$$

$$\Phi_{\text{max,transitorio}} = \frac{U_1}{4,44 f N_1} = \Phi \quad (3.103)$$

Sin embargo, si se acierta a cerrar el interruptor de conexión a la red en un paso por cero de la tensión, el flujo crece durante un semiciclo y alcanza un valor doble del que corresponde a funcionamiento normal.

$$\phi = \frac{1}{N_1} \int_0^t \sqrt{2}U_1 \text{sen } \omega t \cdot dt = \frac{\sqrt{2}U_1}{\omega N_1} (1 - \cos \omega t) \quad (3.104)$$

$$\Phi_{\text{Transitorio}} = 2\Phi \quad (3.105)$$

Como es sabido que los transformadores se diseñan para trabajar en el codo de saturación (en torno a 1,8 T), con lo que durante este transitorio el material magnético sobrepasa ampliamente el codo de saturación.

Ahora bien, el flujo es creado por las corrientes. En tanto en cuanto el flujo sea inferior al de saturación del material magnético la corriente precisa para crearlo es reducida (figura 3.24 a). Sin embargo al crecer el flujo por encima del codo de saturación la corriente precisa para crearlo aumenta desmesuradamente (figura 3.24b).

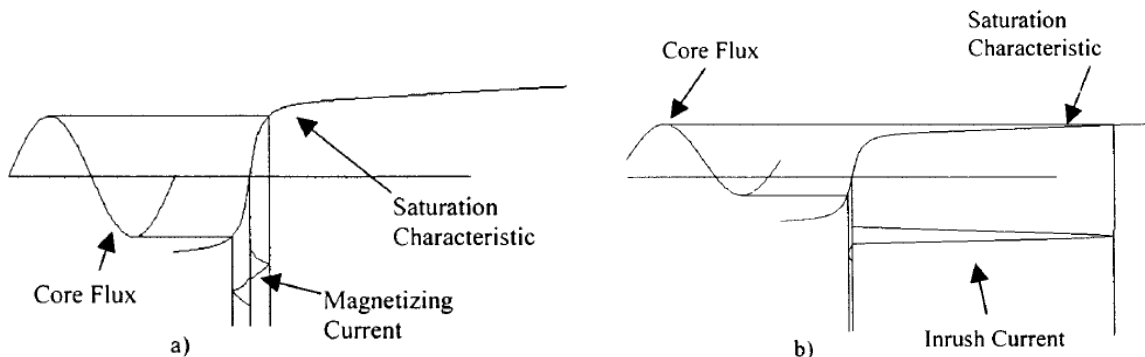


Figura 3.24: Cuando se conecta un transformador en el paso por máximo de la tensión de red la onda de flujo es simétrica con un valor de cresta idéntico al que se tiene en régimen permanente (a). Sin embargo, al conectar en cualquier otro instante la onda de flujo es asimétrica, con lo que el máximo positivo no es igual a la cresta negativa, eso hace que el núcleo magnético entre en saturación.

En realidad, cuando el material magnético se satura su reluctancia aumenta considerablemente, por lo que una cierta parte del flujo se establece por el aire. Eso hace que el transitorio de conexión sea menos violento si se energiza el arrollamiento más externo al núcleo magnético (frecuentemente el arrollamiento de AT) que si se energiza el arrollamiento más interno, ya que el arrollamiento más externo tiene mayor sección de paso de flujo y con ello menor reluctancia.

Si se tiene en cuenta la caída de tensión en la resistencia del arrollamiento primario la ecuación (3.101) se convierte en

$$u_1 = R_1 i_1 + N_1 \frac{d\phi}{dt} \quad (3.106)$$



El efecto de la resistencia del primario es hacer que el transitorio se amortigüe hasta que por fin el flujo resulta del mismo valor que en funcionamiento normal.

El transitorio analizado en este apartado no es perjudicial para el transformador. No obstante las protecciones del mismo pueden interpretar que esta corriente, de valor superior a la nominal, es una corriente de cortocircuito, y se han de tomar medidas para evitar una falsa actuación de las protecciones en este caso. En algunos casos esas medidas pasan por temporizar la actuación de la protección (caso de la protección de sobreintensidad) mientras que en otros se aprovecha la característica de que, a diferencia de las corrientes de cortocircuito, la corriente de magnetización tiene un gran contenido en armónicos.