

UNIVERSIDAD DE CANTABRIA

**DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA ELÉCTRICA
Y ENERGÉTICA**

REGÍMENES TRANSITORIOS

DE LOS

TRANSFORMADORES

Miguel Angel Rodríguez Pozueta

1.- CORTOCIRCUITOS EN TRANSFORMADORES

1.1.- Corriente permanente de cortocircuito

Un cortocircuito es un accidente que se produce cuando se cortocircuita el secundario de un transformador estando su primario conectado a la tensión nominal. A diferencia del ensayo de cortocircuito, en el que el transformador se alimenta a una tensión reducida para que las corrientes que circulan por los devanados no sean peligrosas, en el fallo de cortocircuito van a circular corrientes muy altas, varias veces superiores a la intensidad nominal.

Dado que la corriente de vacío es pequeña frente a la intensidad nominal ($I_0 = 1 \text{ a } 3\% I_{1N}$), resulta despreciable frente a una corriente mucho mayor que la nominal como es la corriente de cortocircuito. Por lo tanto, para el estudio de la corriente de cortocircuito se puede prescindir de la rama en paralelo del circuito equivalente y utilizar el de la figura 1:

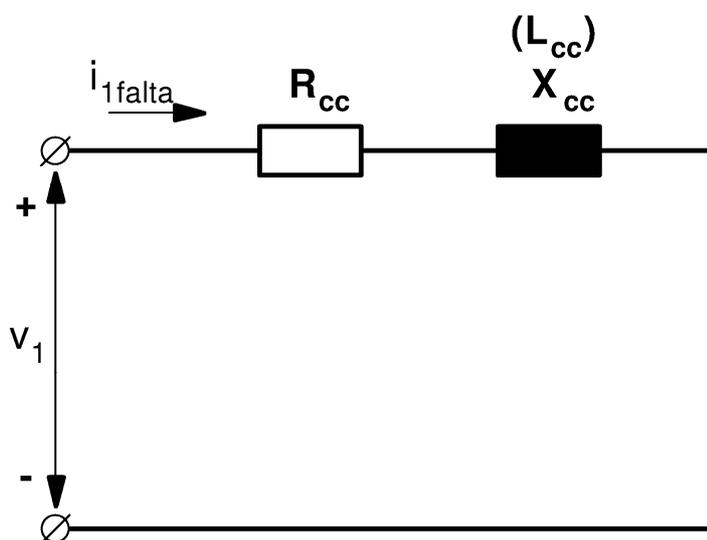


Fig. 1: Circuito equivalente de un transformador en cortocircuito

Si la tensión de alimentación es la nominal, cuyo valor eficaz es V_{1N} , la corriente de cortocircuito en régimen permanente tiene un valor eficaz I_{1falta} que se puede obtener aplicando la Ley de Ohm en la figura 1:

$$I_{1falta} = \frac{V_{1N}}{\sqrt{R_{cc}^2 + X_{cc}^2}} = \frac{V_{1N}}{Z_{cc}} \quad (1)$$

Operando se llega a

$$I_{1falta} = \frac{V_{1N}}{Z_{cc}} \times \frac{I_{1N}}{I_{1N}} \times \frac{100}{100} = I_{1N} \times 100 \times \frac{V_{1N}}{Z_{cc} I_{1N} 100}$$

$$\boxed{I_{1falta} = I_{1N} \times \frac{100}{\epsilon_{cc}}} \quad (2)$$

Por otra parte, como se desprecia la corriente de vacío I_0 , se tiene que:

$$I_{1falta} = I'_{2falta} + I_0 = I'_{2falta} = \frac{I_{2falta}}{m}$$

Es decir, en un cortocircuito se cumple de forma prácticamente exacta que el cociente entre las intensidades del primario y del secundario es igual a la inversa de la relación de transformación. Así pues, la corriente de cortocircuito en el secundario tiene un valor eficaz I_{2falta} que se puede calcular así:

$$I_{2falta} = m I_{1falta} = m I_{1N} \frac{100}{\epsilon_{cc}}$$

$$\boxed{I_{2falta} = I_{2N} \times \frac{100}{\epsilon_{cc}}} \quad (3)$$

Las relaciones (2) y (3) indican que un valor elevado de la corriente relativa de cortocircuito ϵ_{cc} evita que durante un cortocircuito circulen corrientes excesivamente altas por los devanados del transformador. Pero, por otra parte, valores elevados de ϵ_{cc} dan lugar a que se produzcan altas caídas de tensión en el transformador. Por lo tanto, a la hora de diseñar un transformador habrá que dar a ϵ_{cc} un valor de compromiso tal que las corrientes de cortocircuito tengan un valor razonable sin que se produzcan caídas de tensión excesivas en la máquina. En la práctica, para los transformadores de pequeña potencia, inferior a 1000 kVA, se da al coeficiente ϵ_{cc} un valor comprendido entre 1 y 6%; mientras que en los transformadores grandes, de más de 1000 kVA, este coeficiente adopta valores entre 6 y 13%.

1.2.- Corriente transitoria de cortocircuito

La corriente permanente de cortocircuito estudiada en el apartado anterior no aparece de forma instantánea al producirse el fallo de cortocircuito. En un elemento inductivo, como es un transformador, las corrientes no pueden variar bruscamente y se producirá un régimen transitorio desde el momento en que se inicia el cortocircuito hasta que se establece la corriente de régimen permanente.

Durante este proceso transitorio el transformador se puede seguir analizando mediante el circuito equivalente de la Fig. 1; sólo que habrá que utilizar la inductancia L_{cc} en lugar de la reactancia X_{cc} ($X_{cc} = \omega L_{cc} \rightarrow L_{cc} = X_{cc} / \omega$) y se trabajará con los valores instantáneos de la corriente y de la tensión y no con sus valores eficaces.

Se va a suponer que el cortocircuito se produce en el instante $t = 0$, que el transformador funcionaba previamente en vacío y que la tensión del primario es así:

$$v_1 = \sqrt{2} V_{1N} \text{Cos}(\omega t + \psi) \quad (4)$$

Como se está forzando a que el momento en que se produce el cortocircuito sea el instante $t = 0$, el ángulo de desfase ψ de la ecuación (4) dependerá de cuál es el valor instantáneo de la tensión v_1 en el momento de iniciarse el cortocircuito. Habrá que dar al ángulo ψ un valor tal que para $t = 0$ la ecuación (4) dé el valor que tiene v_1 en el instante de producirse el cortocircuito.

Dado el pequeño valor de la corriente de vacío comparada con la de cortocircuito, se la va a despreciar y se utilizará la siguiente condición inicial:

$$i_{1\text{falta}}|_{t=0} = 0 \quad (5)$$

La ecuación diferencial que relaciona los valores instantáneos de la tensión y de la corriente del circuito de la Fig. 1 es:

$$v_1 = R_{cc} i_{1\text{falta}} + L_{cc} \frac{di_{1\text{falta}}}{dt} \quad (6)$$

Si se resuelve la ecuación (6) por el método clásico se tiene que la corriente de cortocircuito es igual a la suma de una solución particular (la corriente de régimen permanente, cuyo valor instantáneo es $i_{1\text{perm}}$) y la solución de la ecuación homogénea (que se denominará $i_{1\text{tran}}$):

$$i_{1\text{falta}} = i_{1\text{perm}} + i_{1\text{tran}} \quad (7)$$

El valor eficaz $I_{1\text{falta}}$ de la corriente de régimen permanente se obtuvo en el apartado anterior (relación (2)) y la impedancia de cortocircuito tiene un argumento ϕ_{cc} :

$$\bar{Z}_{cc} = R_{cc} + jX_{cc} = Z_{cc} \angle \phi_{cc} \quad (8)$$

En consecuencia, teniendo en cuenta también la ecuación (4), la corriente permanente tiene un valor instantáneo $i_{1\text{perm}}$ dado por la siguiente relación

$$i_{1\text{perm}} = \sqrt{2} I_{1\text{falta}} \text{Cos}(\omega t + \psi - \phi_{cc}) \quad (9)$$

Para obtener $i_{1\text{tran}}$ hay que resolver la ecuación homogénea; es decir, la ecuación (6) sin las fuentes (con la tensión v_1 igual a cero):

$$0 = R_{cc} i_{1\text{tran}} + L_{cc} \frac{di_{1\text{tran}}}{dt} \quad (10)$$

La solución de (10) es de la forma:

$$i_{1\text{tran}} = C e^{-\frac{t}{\tau_{cc}}} \quad (11)$$

donde C es una constante que se determinará más tarde.

Sustituyendo (11) en (10) se obtiene que:

$$0 = R_{cc} C e^{-\frac{t}{\tau_{cc}}} + L_{cc} C e^{-\frac{t}{\tau_{cc}}} \left(-\frac{1}{\tau_{cc}} \right) \rightarrow \boxed{\tau_{cc} = \frac{L_{cc}}{R_{cc}} = \frac{X_{cc}}{\omega R_{cc}} = \frac{\epsilon X_{cc}}{\omega \epsilon R_{cc}}} \quad (12)$$

Imponiendo la condición inicial (5) y teniendo presente las relaciones (7), (9) y (11), se deduce que la constante C vale:

$$0 = i_{1\text{falta}}|_{t=0} = \sqrt{2} I_{1\text{falta}} \text{Cos}(\psi - \varphi_{cc}) + C$$

$$C = -\sqrt{2} I_{1\text{falta}} \text{Cos}(\psi - \varphi_{cc}) \quad (13)$$

Es decir, el valor inicial C de la corriente $i_{1\text{tran}}$ es igual al valor inicial de $i_{1\text{perm}}$ cambiado de signo.

La ecuación final de la corriente de cortocircuito se obtiene combinando las relaciones (7), (9), (11), (12) y (13):

$$\boxed{i_{1\text{falta}} = \sqrt{2} I_{1\text{falta}} \left[\text{Cos}(\omega t + \psi - \varphi_{cc}) - \text{Cos}(\psi - \varphi_{cc}) e^{-\frac{t}{X_{cc}/\omega R_{cc}}} \right]} \quad (14)$$

En la figura 2 se muestra un ejemplo de cómo son las corrientes $i_{1\text{falta}}$, $i_{1\text{perm}}$ e $i_{1\text{tran}}$ en un cortocircuito.

Un caso interesante es cuando el cortocircuito se produce en un instante tal que el ángulo $(\psi - \varphi_{cc})$ vale $\pi/2$ o $3\pi/2$; es decir, cuando la corriente permanente de cortocircuito $i_{1\text{perm}}$ tiene un valor inicial nulo. En este caso la constante C (relación (13)) vale cero y no existe la componente transitoria $i_{1\text{tran}}$. Este caso es el más favorable pues la corriente de cortocircuito entra directamente en el régimen permanente y no existe un proceso transitorio donde la corriente puede alcanzar mayores valores. Esta situación está representada en la Fig. 3.

Por el contrario, la situación más desfavorable, cuando la corriente alcanza mayores valores durante el régimen transitorio del cortocircuito, es cuando el ángulo $(\psi - \varphi_{cc})$ vale 0 o π ; es decir, cuando el cortocircuito empieza justo en el momento en que la corriente permanente de cortocircuito $i_{1\text{perm}}$ tiene un valor máximo positivo o negativo. En la Fig. 4 se representa uno de estos casos (cuando $(\psi - \varphi_{cc}) = \pi$).

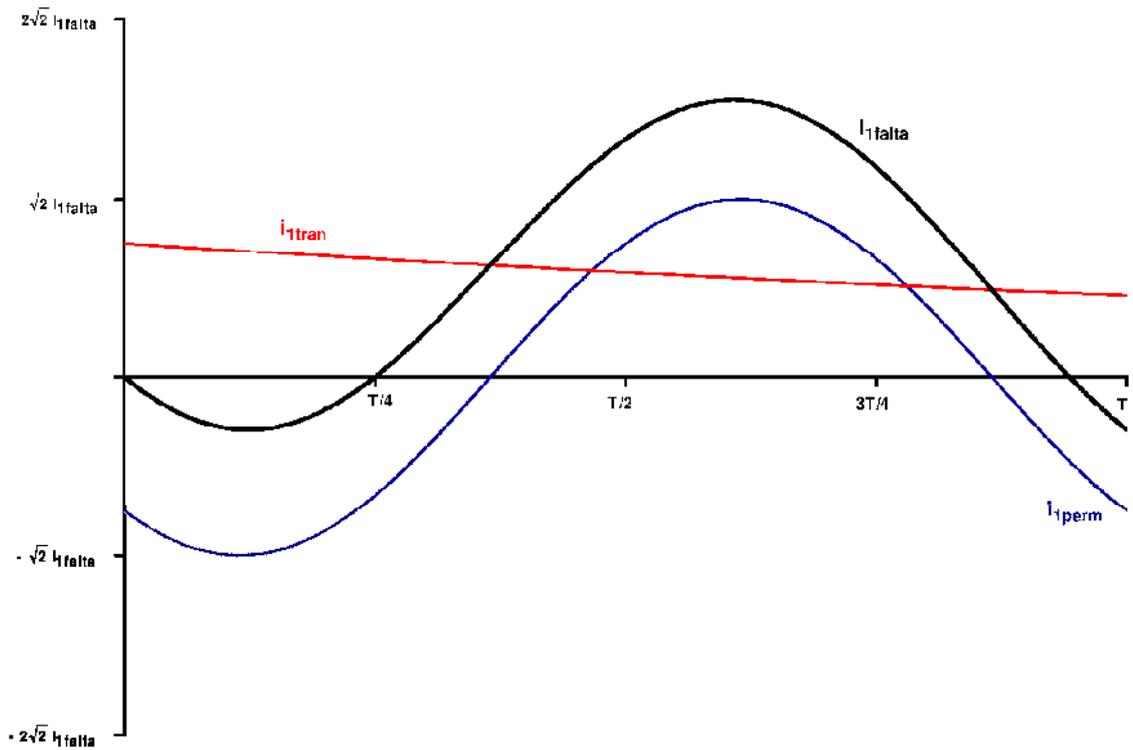


Fig. 2: Evolución de la corriente durante el cortocircuito de un transformador

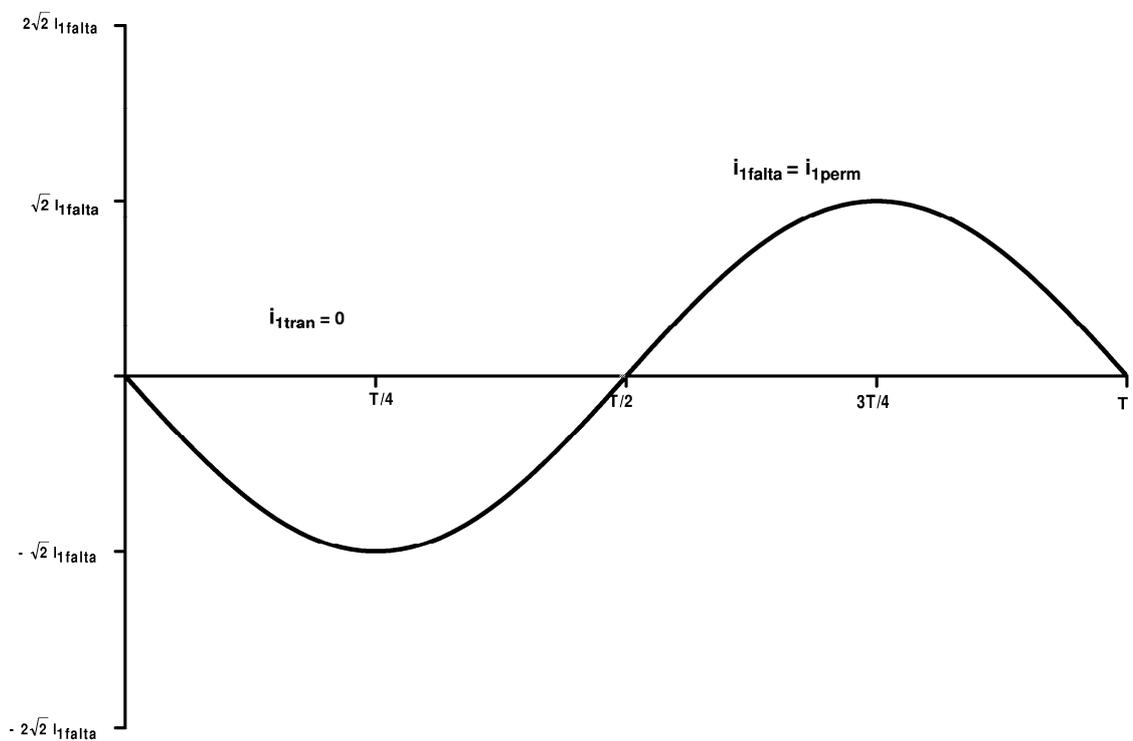


Fig. 3: Evolución de la corriente de cortocircuito de un transformador en el caso más favorable

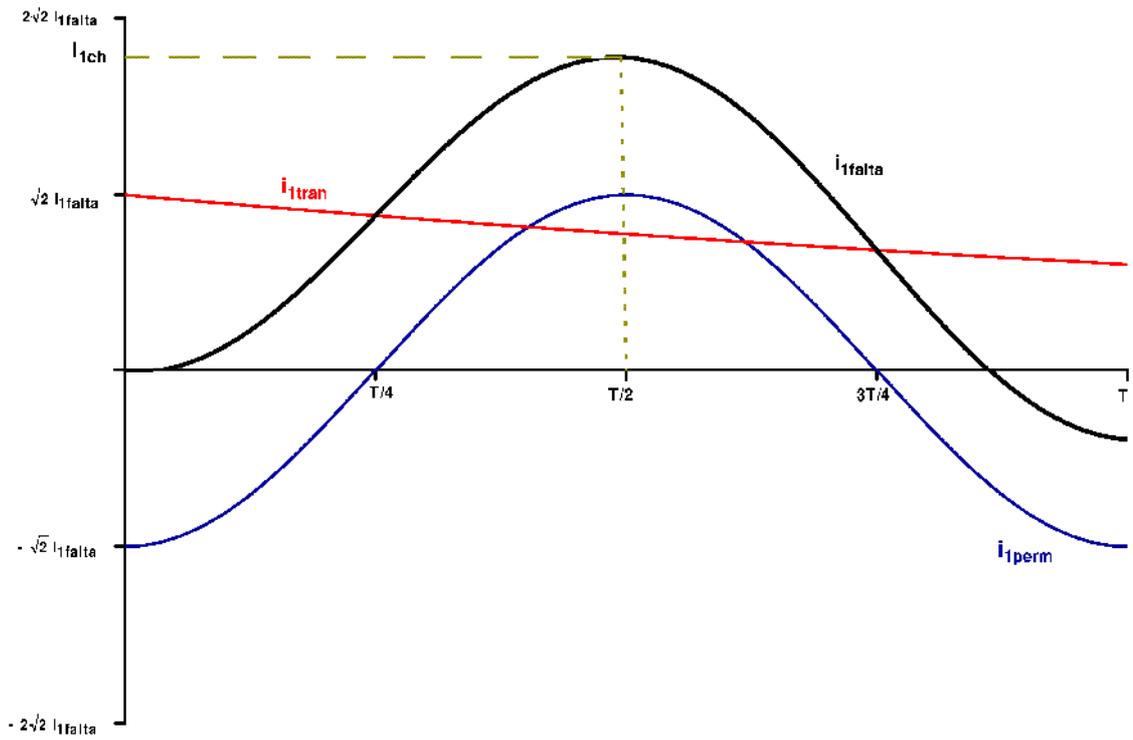


Fig. 4: Evolución de la corriente de cortocircuito de un transformador en el caso más desfavorable y corriente de choque

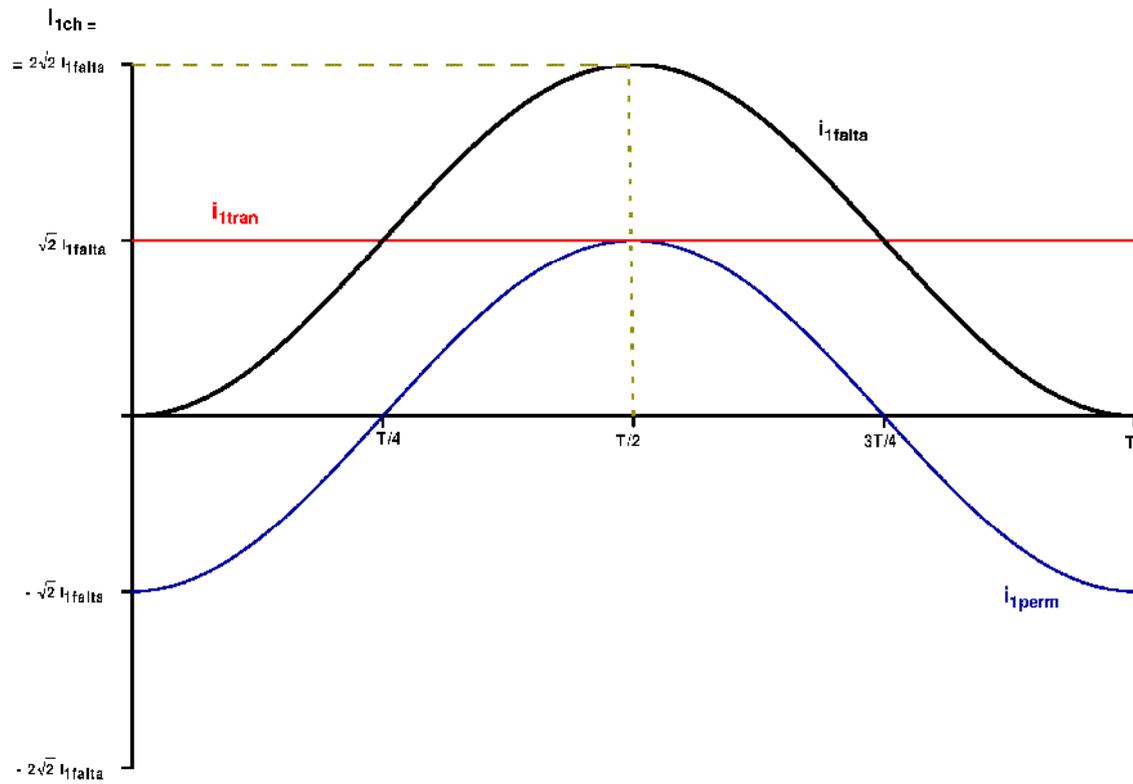


Fig. 5: Obtención del límite superior de la corriente de choque

1.3.- Corriente de choque

Dado que las elevadas corrientes que circulan por los devanados de un transformador durante un cortocircuito son peligrosas para la integridad del mismo, a la hora de proteger el transformador contra estas corrientes resultará interesante el conocer cuál será el máximo valor que éstas pueden llegar a alcanzar.

La corriente de choque I_{1ch} es el máximo valor instantáneo que puede alcanzar la corriente que circula por el primario del transformador cuando el cortocircuito se produce en las peores condiciones posibles.

Como ya se indicó en el apartado anterior, el cortocircuito se produce en las peores condiciones si se inicia cuando la componente permanente i_{1perm} alcanza su valor máximo positivo o negativo. Observando la Fig. 3 se aprecia que en este caso la corriente i_{1falta} alcanza su valor máximo cuando el tiempo t vale aproximadamente la mitad del periodo T .

Por lo tanto,

$$I_{1ch} = i_{1falta} \Big|_{\substack{t=T/2 \\ C=\sqrt{2} I_{1falta}}} \\ I_{1ch} = \sqrt{2} I_{1falta} \left[1 + e^{-\frac{T/2}{\tau_{cc}}} \right] \quad (15)$$

Partiendo de la relación (12) se deduce que:

$$\frac{T/2}{\tau_{cc}} = \frac{T/2}{\frac{X_{cc}}{\omega R_{cc}}} = \frac{(T/2)(2\pi f R_{cc})}{X_{cc}} = \frac{\left(\frac{T}{2}\right)\left(\frac{2\pi}{T} R_{cc}\right)}{X_{cc}} = \pi \frac{R_{cc}}{X_{cc}} = \pi \frac{\epsilon_{Rcc}}{\epsilon_{Xcc}} \quad (16)$$

pues se cumple que

$$\omega = 2\pi f = \frac{2\pi}{T}$$

Luego, combinando las expresiones (15) y (16) se obtiene que:

$$\boxed{I_{1ch} = \sqrt{2} I_{1falta} \left[1 + e^{-\pi \frac{R_{cc}}{X_{cc}}} \right] = \sqrt{2} I_{1falta} \left[1 + e^{-\pi \frac{\epsilon_{Rcc}}{\epsilon_{Xcc}}} \right]} \quad (17)$$

Se puede encontrar otra expresión de la corriente de choque más inexacta, pero muy cómoda y fácil de calcular. Realmente, lo que se va a obtener es un límite superior de la corriente de choque; es decir, la corriente de choque será igual o inferior al valor que se va a determinar. Para ello, supóngase un caso peor que la realidad en el que la constante de tiempo

τ_{cc} es tan grande que se puede aceptar que durante el primer medio ciclo de la onda la componente i_{1tran} apenas disminuye y permanece constante e igual a $\sqrt{2} I_{Ifalta}$. En este caso, tal como se aprecia en la Fig. 5, la corriente de choque se produciría exactamente al cabo de $T/2$ segundos y valdrá:

$$I_{1ch} = 2 \sqrt{2} I_{Ifalta} \quad (18)$$

En realidad la constante de tiempo τ_{cc} no es tan grande y la corriente de choque tiene valores más pequeños que el indicado en (18). Así, en la práctica I_{1ch} alcanza valores comprendidos entre estos límites:

$$I_{1ch} = \begin{cases} (1,2 \text{ a } 1,3) \sqrt{2} I_{Ifalta} & \text{Para transformadores pequeños} \\ (1,7 \text{ a } 1,85) \sqrt{2} I_{Ifalta} & \text{Para transformadores grandes} \end{cases} \quad (19)$$

Por lo tanto, a efectos prácticos se puede decir que la corriente de choque de un transformador cumplirá que:

$$I_{1ch} \leq 1,8 \sqrt{2} I_{Ifalta}$$

$I_{1ch} \leq 2,5 I_{Ifalta}$

(20)

Así pues, si basta con un cálculo rápido y aproximado de la corriente de choque se utilizará la expresión (20), pero si se desea un cálculo más exacto se deberá emplear la relación (17).

1.4.- Efectos de un cortocircuito sobre un transformador

Las elevadas corrientes que circulan por los devanados de un transformador cuando se produce un cortocircuito dan lugar a efectos peligrosos para la máquina.

La primera consecuencia es de tipo térmico. En efecto, al ser las corrientes de cortocircuito varias veces mayores que las corrientes nominales de los devanados del transformador aparecen unas pérdidas por efecto Joule (pérdidas en el cobre) muy superiores a las nominales, lo que origina un aumento peligroso de la temperatura.

Ahora bien, la masa del transformador impide que este aumento de temperatura sea instantáneo; tiene que pasar un tiempo desde que empieza el cortocircuito hasta que el calor generado por éste eleve la temperatura de la máquina hasta niveles peligrosos. Este tiempo de calentamiento es mucho mayor que la constante de tiempo τ_{cc} , lo que significa que prácticamente durante todo este tiempo de calentamiento las corrientes que circulan por los devanados del transformador están en su régimen permanente (porque la componente transitoria se anula en los primeros momentos, cuando el transformador apenas a empezado a aumentar su temperatura). Dicho de otra manera, la componente transitoria de las corrientes de cortocircuito de los devanados proporciona una cantidad de calor muy pequeña comparada con la necesaria para elevar la temperatura del transformador hasta valores peligrosos y, en consecuencia, se la puede despreciar y sólo tener en cuenta la componente permanente.

Así pues, a la hora de analizar el efecto térmico de las corrientes de cortocircuito bastará con trabajar con los valores eficaces I_{1falta} e I_{2falta} de la componente permanente de las corrientes de cortocircuito.

El otro efecto peligroso de las corrientes de cortocircuito es de tipo mecánico. Los bobinados de la máquina son, al fin de cuentas, una serie de conductores próximos y recorridos por corrientes. Es sabido cuando existen dos conductores recorridos por corrientes aparecen entre ellos unas fuerzas (Fuerzas de Laplace) que tienden a desplazarlos o a deformarlos. Estas fuerzas surgen de forma instantánea en cuanto circulan las corrientes y alcanzan mayores valores cuanto mayores son las corrientes. Por lo tanto, a la hora de analizar estas fuerzas en un cortocircuito habrá que considerar el caso más peligroso que es cuando la corriente de cortocircuito toma su mayor valor instantáneo; esto es, cuando circula la corriente de choque I_{1ch} .

Las fuerzas que aparecen sobre los devanados del transformador durante un cortocircuito tienen dos componentes: *radiales*, que tienden a comprimir el devanado interior y a expandir el devanado exterior, y *axiales*. Para prevenir los efectos perjudiciales de estas fuerzas habrá que diseñar el transformador de forma que los devanados estén firmemente sujetos y puedan soportar estas fuerzas incluso cuando circula la corriente de choque. Por lo tanto, la magnitud de la corriente de cortocircuito a emplear para estudiar los efectos mecánicos de los cortocircuitos en los transformadores es la corriente de choque I_{1ch} .

1.5.- Anexo: Formulario sobre el ensayo y las tensiones relativas de cortocircuito

- Ensayo de cortocircuito cortocircuitando el primario y alimentando por el secundario:

$$V_{2corto} \quad I_{2corto} \quad P_{corto}$$

- Ensayo de cortocircuito cortocircuitando el secundario y alimentando por el primario:

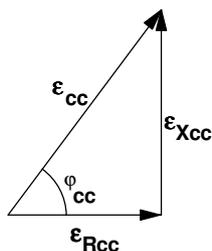
$$V_{1corto} \quad I_{1corto} \quad P_{corto}$$

- Ensayo de cortocircuito cortocircuitando el secundario y alimentando por el primario de forma que circule la corriente nominal (es un caso particular del anterior):

$$V_{1cc} \quad I_{1N} \quad P_{cc} \quad (P_{cc} \approx P_{CuN})$$

$$m = \frac{V_{1corto}}{V_{2corto}} = \frac{I_{2corto}}{I_{1corto}} \quad V_{1cc} = V_{1corto} \frac{I_{1N}}{I_{1corto}} \quad P_{cc} = P_{corto} \left(\frac{I_{1N}}{I_{1corto}} \right)^2$$

- Tensiones relativas de cortocircuito:



$$\epsilon_{cc} = \frac{V_{1cc}}{V_{1N}} \cdot 100 = \frac{Z_{cc} \cdot I_{1N}}{V_{1N}} \cdot 100$$

$$\epsilon_{Rcc} = \frac{R_{cc} \cdot I_{1N}}{V_{1N}} \cdot 100 = \frac{P_{cc}}{S_N} \cdot 100 = \epsilon_{cc} \cdot \cos \varphi_{cc}$$

$$\epsilon_{Xcc} = \frac{X_{cc} \cdot I_{1N}}{V_{1N}} \cdot 100 = \sqrt{\epsilon_{cc}^2 - \epsilon_{Rcc}^2} = \epsilon_{cc} \cdot \sin \varphi_{cc}$$

2.- CORRIENTE DE CONEXIÓN DE UN TRANSFORMADOR

En este capítulo se va a estudiar la corriente que circula por el primario de un transformador en el momento en que se lo conecta a la red.

Para simplificar el estudio se va a analizar un transformador que se conecta a la red estando en vacío; es decir, con el devanado secundario en circuito abierto. De momento, no se va a tener en cuenta el efecto de la histéresis del circuito magnético del transformador, por lo que no se considerará el flujo remanente que pueda haber quedado en el núcleo magnético debido a magnetizaciones anteriores y se supondrá que la relación entre el flujo y la corriente que circula por el primario viene dada por la curva de magnetización de la Fig. 7.

Cuando este transformador esté conectado por el primario a la tensión nominal y funcione en vacío, la corriente de vacío en régimen permanente es tan pequeña que se pueden despreciar las caídas de tensión en el primario y aceptar que:

$$I_0 \ll \rightarrow \bar{V}_1 = \bar{E}_1$$

lo que, trabajando con valores instantáneos, significa que:

$$v_1 = e_1 = N_1 \frac{d\Phi}{dt} \quad (21)$$

Es decir, en el régimen permanente de vacío el flujo magnético se obtiene integrando la tensión del primario. Por lo tanto, si la tensión de alimentación varía sinusoidalmente con el tiempo se obtiene que el flujo también es una función sinusoidal del tiempo y se encuentra desfasado 90 grados con respecto a la tensión. En la Fig. 6 se muestran las ondas de tensión y de flujo durante el régimen permanente de la marcha en vacío.

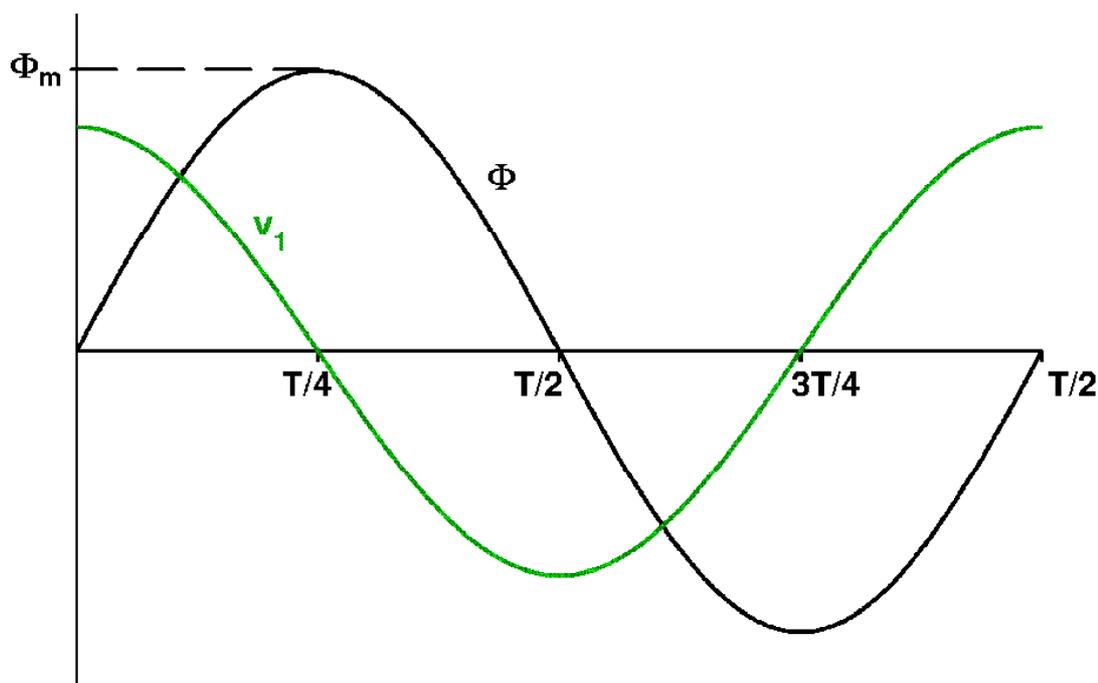


Fig. 6: Tensión y flujo durante el régimen permanente de la marcha de vacío

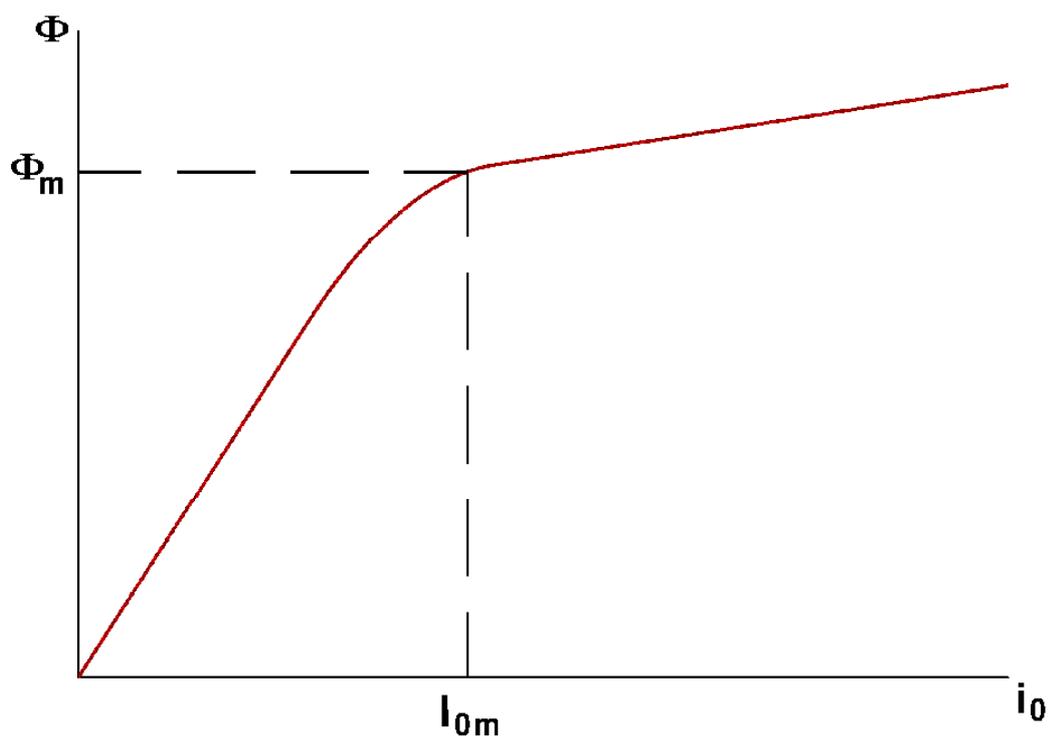


Fig. 7: Característica de vacío de un transformador

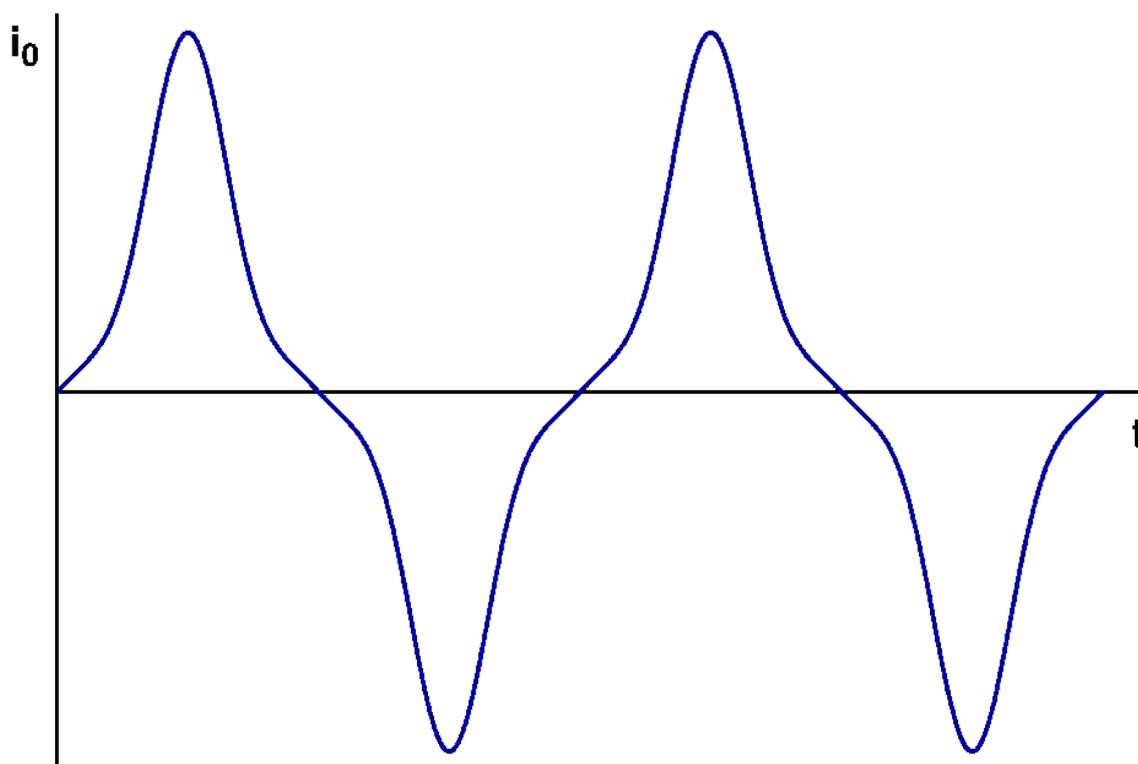


Fig. 8: Corriente de vacío en régimen permanente

Dado que la relación entre el flujo y la corriente de vacío está dada por la curva de magnetización o de vacío (Fig. 7), la cual no es una relación lineal; se obtiene que si el flujo en régimen permanente es una función sinusoidal (ver la Fig. 6) la corriente de vacío no lo es y tiene la forma representada en la Fig. 8.

Normalmente los transformadores se diseñan para que a la tensión nominal el núcleo magnético se encuentre en la zona del codo de la curva de magnetización, como se puede apreciar en la Fig. 7 donde se indican los valores máximos del flujo Φ_m y de la corriente I_{0m} del transformador en el régimen permanente de la marcha de vacío.

Ahora bien, es sabido que en un circuito inductivo el flujo no puede cambiar bruscamente de valor. Por lo tanto, si el transformador se encontraba previamente desconectado y con un flujo nulo en su circuito magnético y se conecta su primario a la tensión nominal en el instante $t = 0$; el flujo en los primeros instantes debe conservar su valor inicial nulo. Esto significa que el flujo tendrá que pasar por un régimen transitorio para cambiar su valor desde cero al correspondiente al régimen permanente de la marcha en vacío.

La evolución del flujo durante este régimen transitorio es muy similar a la de la corriente de cortocircuito estudiada en el capítulo anterior. Si en el momento de conectar el transformador coincidiera que la componente permanente del flujo tiene valor nulo (lo que equivale a que la tensión v_1 alcanza un máximo positivo o negativo (ver la Fig. 6)), no existirá el régimen transitorio y el flujo entrará directamente en el régimen permanente sin que se produzca ninguna discontinuidad en su valor antes y después de la conexión. Este caso es el representado en las Figs. 6 y 8. En las demás situaciones el flujo tendrá una componente transitoria Φ_{tran} que se amortigua exponencialmente y que se suma a la componente permanente Φ_{perm} .

El caso más desfavorable es cuando la conexión se realiza en el momento en que la componente permanente del flujo es máxima positiva o negativa, lo que significa que la tensión tiene un valor nulo en el momento de conectar el primario del transformador (ver la Fig. 9). En este caso, la componente transitoria debe tener un valor inicial igual al máximo (negativo o positivo) de la componente permanente para que el flujo total sea cero en el instante inicial. De modo análogo a como se explicó en el capítulo anterior para la corriente de choque, se obtiene que el valor máximo del flujo en este caso sucede aproximadamente para el instante $t = T/2$. Por otra parte, la componente transitoria del flujo tiene una constante de tiempo que es mucho mayor que la constante τ_{cc} de los cortocircuitos (ya que en ella interviene la reactancia magnetizante X_μ , que es mucho mayor que la reactancia de cortocircuito X_{cc}), y apenas se amortigua durante el primer semiperiodo. Esto indica que en este caso el flujo alcanza un valor máximo aproximadamente igual a 2 veces el flujo máximo Φ_m de régimen permanente (Fig. 9).

Como, además, existe el fenómeno de la histéresis, puede suceder que el transformador quede con un flujo remanente cuando se lo desconecta, el cual puede alcanzar valores de hasta la mitad del flujo máximo en régimen permanente ($\Phi_r \leq 0,5 \Phi_m$). Entonces, al volverlo a conectar a la red, el flujo inicial no será nulo, como se ha supuesto hasta ahora, sino que valdrá Φ_r . Teniendo esto en cuenta se deduce que al conectar un transformador a la red, el flujo del transformador puede llegar a alcanzar un valor máximo igual a

$$2 \Phi_m + \Phi_r = 2,5 \Phi_m \quad (22)$$

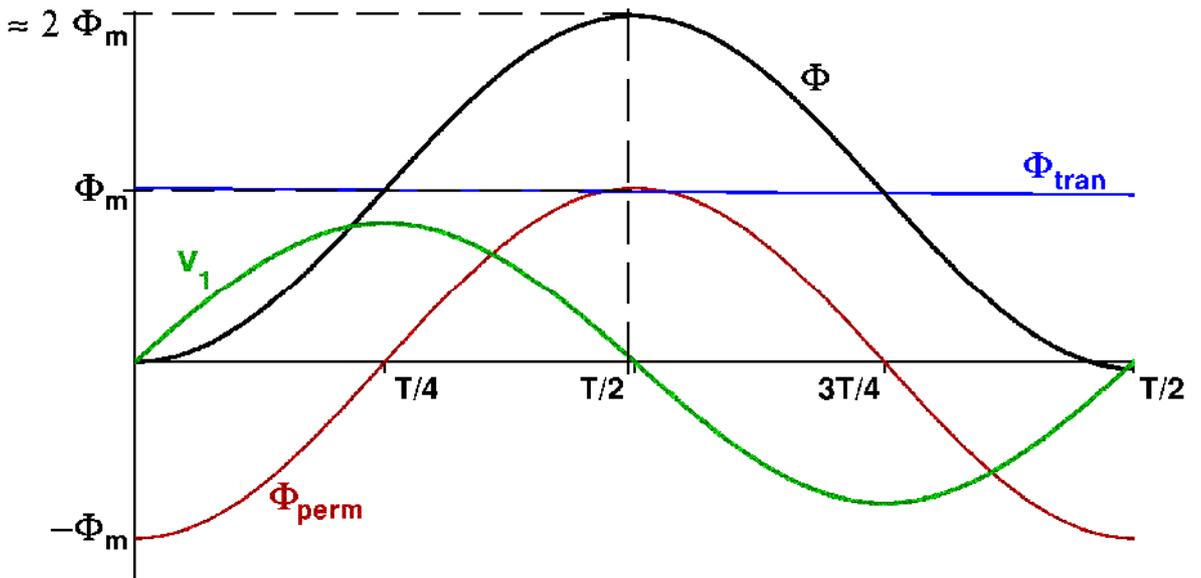


Fig. 9: Evolución del flujo al conectar un transformador en vacío en el momento más desfavorable (se ha supuesto que no existe flujo remanente)

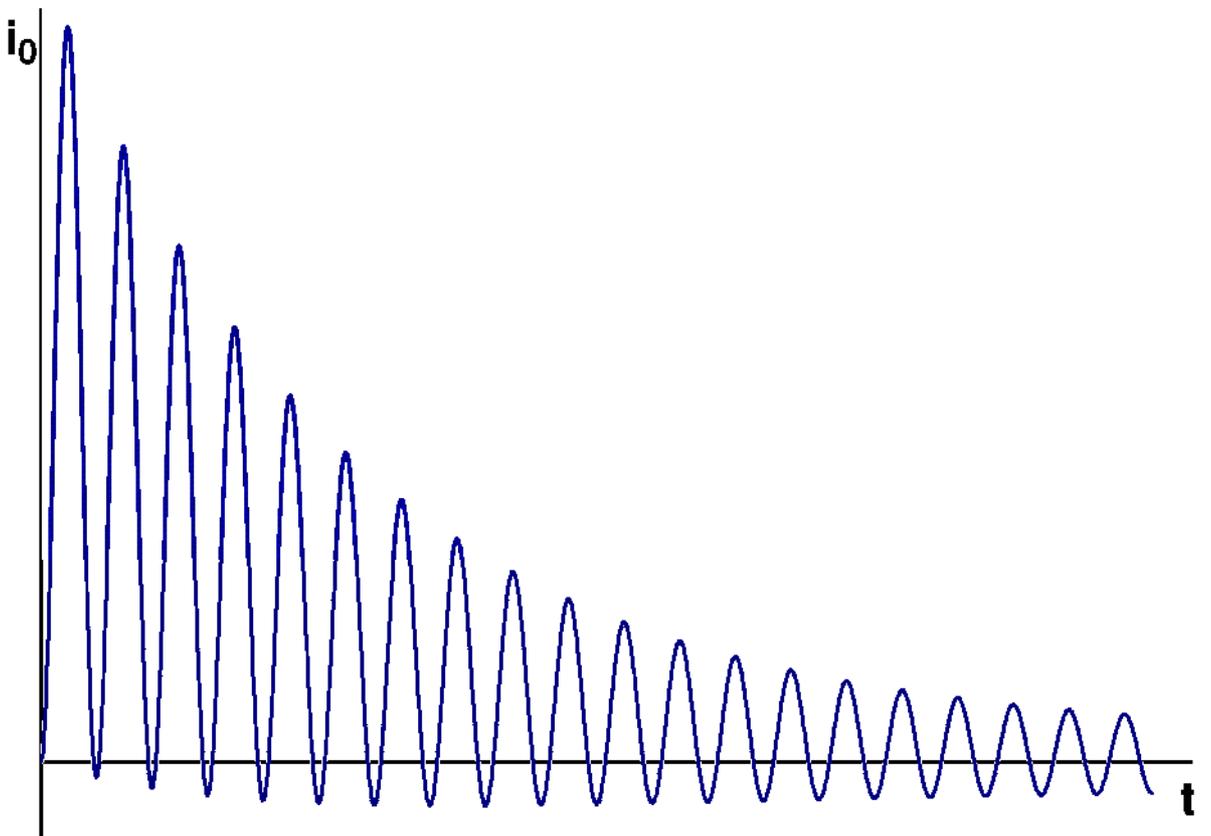


Fig. 10: Evolución de la corriente de conexión de un transformador en vacío en el caso más desfavorable

UNIVERSIDAD DE CANTABRIA – DPTO. DE INGENIERIA ELÉCTRICA Y ENERGÉTICA
REGÍMENES TRANSITORIOS DE LOS TRANSFORMADORES

El hecho de que la relación entre el flujo y la corriente venga dada por la curva de vacío (Fig. 7), la cual es una relación no lineal, y de que el flujo Φ_m esté situado sobre el codo de saturación, indican que cuando el flujo alcance un valor de $2,5 \Phi_m$ la corriente será muchas veces mayor a la corriente máxima de vacío I_{0m} en régimen permanente.

En resumen, al conectar un transformador se produce un proceso transitorio donde el flujo puede llegar a valer hasta $2,5 \Phi_m$ y la corriente alcanzar valores muy superiores a I_0 , del orden de 100 veces I_0 ; es decir, de 5 a 8 veces la corriente nominal I_{1N} .

Sucede que la componente transitoria de la corriente tiene poca duración y enseguida desaparece quedando sólo su componente de régimen permanente, por lo que no existe peligro para la máquina (pues es la componente transitoria la que es elevada, mientras que la componente permanente es pequeña). Sin embargo, hay que tener en cuenta el valor máximo que puede alcanzar la corriente de conexión para el diseño de las protecciones del transformador y así evitar que éstas puedan actuar de forma intempestiva en el momento de conectarlo e impidan la realización de esta maniobra. Normalmente, las protecciones de corriente del transformador actúan con un cierto retraso para sobrecorrientes del orden de 5 a 8 veces la corriente nominal, con lo que dan tiempo a que la corriente de conexión se amortigüe sin que se produzca su actuación.

PROBLEMAS DE CORTOCIRCUITOS EN TRANSFORMADORES

- 1) Un transformador monofásico de 500 kVA, 15000/3000 V, 50 Hz ha dado estos resultados en un ensayo de cortocircuito:

$$\begin{array}{ccc} 126 \text{ V} & 140 \text{ A} & 7056 \text{ W} \\ \text{(Medidas realizadas en el lado de B.T.)} & & \end{array}$$

Calcular:

- La tensión relativa de cortocircuito ϵ_{cc} . (Solución: 5%)
 - La corriente permanente de cortocircuito. (Solución: 667 A)
 - La corriente de choque de cortocircuito. (Solución: 1180 A)
- 2) Un transformador monofásico de 10000 kVA, 24000/6000 V, 50 Hz ha sido ensayado en cortocircuito y se han obtenido estos resultados:

$$\begin{array}{ccc} 1000 \text{ V} & 400 \text{ A} & 60 \text{ kW} \\ \text{(Medidas en el lado de Alta Tensión)} & & \end{array}$$

Calcular:

- Los parámetros Z_{cc} , R_{cc} , X_{cc} y ϵ_{cc} de este transformador. (Solución: 2,5 Ω ; 0,375 Ω ; 2,47 Ω ; 4,34 %)
 - Corriente de cortocircuito en régimen permanente. (Solución: 9601 A)
 - Intensidad de choque en el cortocircuito. (Solución: 22082 A)
- 3) Un transformador monofásico de 5000 kVA, 12000/30000 V, 50 Hz ha sido ensayado en cortocircuito y se han obtenido estos resultados:

$$\begin{array}{ccc} 500 \text{ V} & 400 \text{ A} & 20000 \text{ W} \\ \text{(Medidas en el lado de Baja Tensión)} & & \end{array}$$

Calcular:

- Los parámetros Z_{cc} , R_{cc} , X_{cc} y ϵ_{cc} de este transformador. (Solución: 1,25 Ω ; 0,125 Ω ; 1,24 Ω ; 4,34 %)
 - Corriente de cortocircuito en régimen permanente. (Solución: 9599 A)
 - Intensidad de choque en el cortocircuito. (Solución: 23476 A)
- 4) En un transformador monofásico de 6000/3000 V, 300 kVA y 50 Hz se ha realizado un ensayo de cortocircuito en el que las medidas obtenidas han sido las siguientes:

$$378 \text{ V} \quad 45 \text{ A} \quad 5346 \text{ W} \quad \text{(Datos medidos en el lado de AT)}$$

Calcular:

- Los parámetros ϵ_{cc} , ϵ_{Rcc} y ϵ_{Xcc} de este transformador. (Solución: 7%; 2,2%; 6,64%)
 - Corrientes permanente y de choque en el primario cuando se produce un cortocircuito en bornes del secundario. (Solución: 714 A; 1368 A)
- 5) Un transformador monofásico de 300 kVA, 3000/400 V, 50 Hz y $\epsilon_{cc} = 5\%$ consume 5120 W durante un ensayo de cortocircuito a la intensidad asignada. Calcule la corriente de cortocircuito permanente en el primario y la corriente de choque. (Solución: 2000 A; 3730 A)

UNIVERSIDAD DE CANTABRIA – DPTO. DE INGENIERIA ELÉCTRICA Y ENERGÉTICA
REGÍMENES TRANSITORIOS DE LOS TRANSFORMADORES

- 6) Un transformador trifásico Yd5 de 800 kVA, 15000/5000 V, 50 Hz ha dado estos resultados en un ensayo de cortocircuito:

$$253,3 \text{ V} \quad 78 \text{ A} \quad 10153 \text{ W}$$

Calcular:

- a) La tensión relativa de cortocircuito ϵ_{cc} . (Solución: 6%)
 - b) Las corrientes permanentes de línea de cortocircuito en el primario y en el secundario. (Solución: 513 A; 1540 A)
 - c) La corriente de choque de cortocircuito (valor de línea). (Solución: 999 A)
- 7) Un transformador trifásico Dy11 de 4 MVA, 33000/13200 V, 50 Hz ha dado estos resultados en un ensayo de cortocircuito:

$$2801 \text{ V} \quad 66 \text{ A} \quad 103175 \text{ W}$$

Calcular:

- a) Los parámetros ϵ_{cc} , ϵ_{Rcc} y ϵ_{Xcc} de este transformador. (Solución: 9%; 2,9%; 8,52%)
- b) Corrientes de línea permanente y de choque en el primario cuando se produce un cortocircuito en bornes del secundario. (Solución: 778 A; 1477 A)