

en el circuito de dispersión, considerándolo formado únicamente de aire. Por supuesto, el error introducido al desprestigiar el hierro dependerá del punto de la curva de imanación en que está trabajando el núcleo.

Del apartado 5.2.4 se tiene que L_1 es constante (la permeabilidad del aire es constante). Escribiendo en forma fasorial la Ec. 5.32:

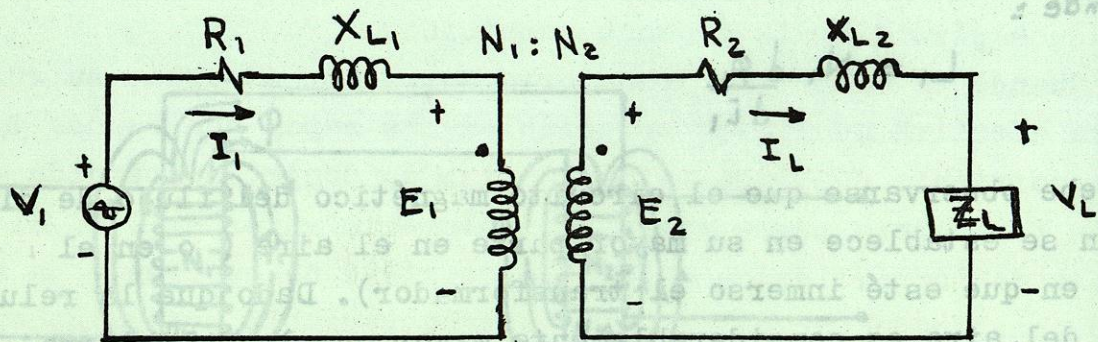
$$E_1' = L_1 \frac{dI_1}{dt} = j\omega L_1 I_1 \quad 5.33$$

$$\frac{E_1'}{I_1} = j\omega L_1 = jX_{L1} \quad 5.34$$

Lo cual demuestra que el efecto del flujo de dispersión en el primario puede definirse como una reactancia inductiva conectada en serie con la fuente de alimentación. Recuérdese que la REACTANCIA se define como el efecto de la fuerza contraelectromotriz inducida por un elemento reactivo, medida en ohms. En forma análoga se desarrolla para el secundario la siguiente expresión:

$$\frac{E_2'}{I_2} = j\omega L_2 = jX_{L2} \quad 5.35$$

El circuito equivalente del transformador, toma entonces la forma siguiente:

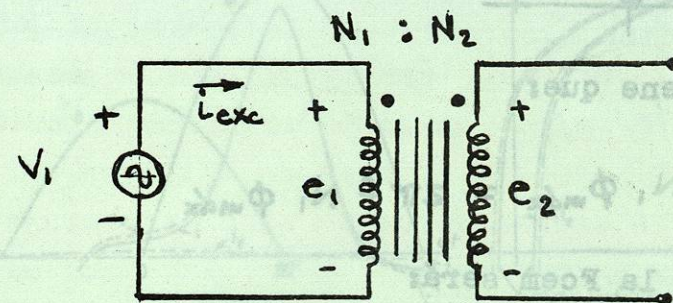


En los transformadores actuales, el primario y el secundario no se disponen sobre dos brazos separados del núcleo, como en la Fig. 13, porque si estuviesen tan separados se produciría una gran dispersión de flujo en los devanados, que daría origen a una regulación demasiado deficiente del transformador e impropia para su empleo industrial. Para reducir las fugas se deben alternar las espiras del primario y del secundario. Cada uno de los arrollamientos se divide regularmente en determinado número de bobinas, que se colocan alternadas y unas junto a otras, como lo ilustran las Figs. 3 y 4 de este capítulo.

Las hipótesis 2 y 4 del transformador ideal presuponen que cuando el secundario está abierto ($I_2=0$) la corriente del primario debe ser igual a cero, según la Ec. 5.22. Sin embargo, en un transformador real sí existen pérdidas de potencia en el núcleo y la permeabilidad del núcleo tiene un valor finito, requiriéndose entonces una corriente estable que mantenga circulando el flujo principal y que englobe a las pérdidas de núcleo. Se define entonces a la CORRIENTE DE EXCITACION como aquella corriente que circula en el primario cuando el secundario está en circuito abierto, es decir, aquella que produce el flujo y alimenta las pérdidas de núcleo.

Para determinar las características de los elementos que representarán a la corriente de excitación, partiremos nuevamente del transformador ideal con núcleo de hierro.

Se tiene un transformador ideal con núcleo de hierro, sin carga en el secundario y alimentado por un voltaje sinusoidal:



$$v_1 = e_1 = N \frac{d\phi}{dt} \quad 5.36$$

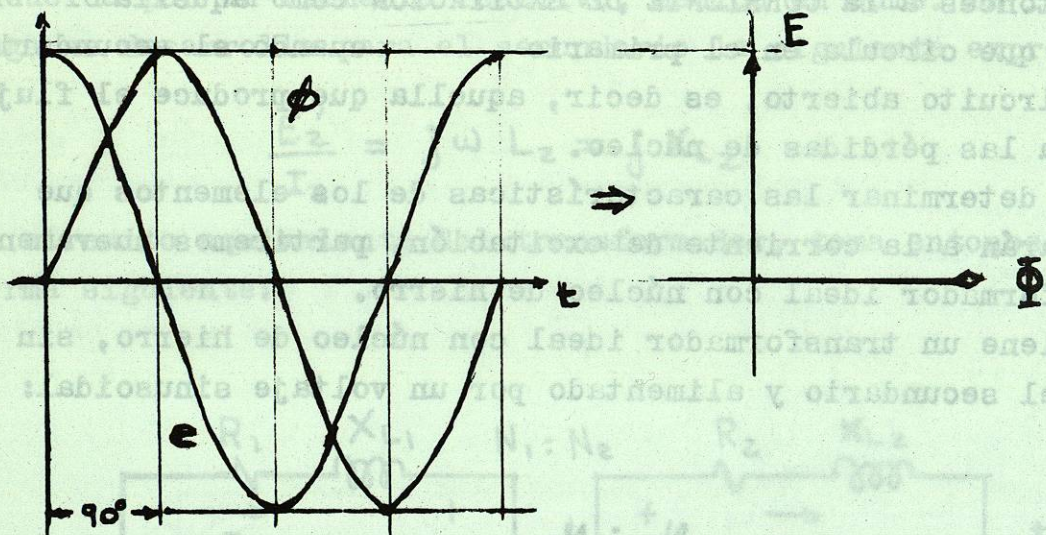
Según 5.36, el flujo debe ajustarse por sí mismo de manera que la fuerza contraelectromotriz generada sea igual a la tensión aplicada, y en consecuencia, la corriente de excitación deberá ajustarse por sí misma para crear este flujo. Si la forma de onda de la tensión aplicada es sinusoidal, la forma de onda del flujo será también sinusoidal. Si

$$\phi = \phi_{m\acute{a}x} \text{ sen } \omega t \quad 5.37$$

Derivando 5.37 y substituyendo en 5.36:

$$e_1 = \omega N \phi_{m\acute{a}x} \text{ cos } \omega t \quad 5.38$$

Gráficamente:



De la Ec. 5.38 se tiene que:

$$e_{m\acute{a}x} = \omega N_1 \phi_{m\acute{a}x} = 2\pi f N_1 \phi_{m\acute{a}x}$$

y el valor eficaz de la Fcem será:

$$e_{ef.} = E_1 = \frac{1}{\sqrt{2}} 2\pi f N_1 \phi_{m\acute{a}x}$$

$$E_1 = 4.44 f N_1 \phi_{m\acute{a}x} \quad 5.39$$

donde E_1 está en volts y $\phi_{m\acute{a}x}$ en Webers.

La Ec. 5.39 es una de las relaciones más importantes de la teoría de todos los aparatos electromagnéticos de corriente alterna, puesto que relaciona el diseño del devanado (N_1 espiras) con la carga magnética del núcleo ($\phi_{m\acute{a}x}$, que es el flujo principal) cuando se especifican las condiciones eléctricas de funcionamiento (E y f). Constituye la relación general entre el valor eficaz de la tensión generada por un flujo variable sinusoidalmente y el valor máximo de dicho flujo.

Otro detalle que debe observarse es que el valor del flujo es independiente de las dimensiones y calidad del núcleo magnético, siempre que la caída óhmica entre terminales sea despreciable ($v_1 \approx e_1$). Las dimensiones y calidad del núcleo determinan, no obstante, la intensidad de la corriente de excitación requerida para crear el flujo en el núcleo; a menor permeabilidad del núcleo, mayor corriente de excitación.

Debido a la forma peculiar del ciclo de histéresis de la mayoría de los materiales magnéticos para núcleos, la forma de onda de la corriente de excitación no es sinusoidal cuando el flujo varía sinusoidalmente. La Fig. 14 indica una técnica gráfica para determinar la forma de onda de la corriente de excitación, a partir de las formas de onda de voltaje, flujo y del lazo de histéresis del material del núcleo.

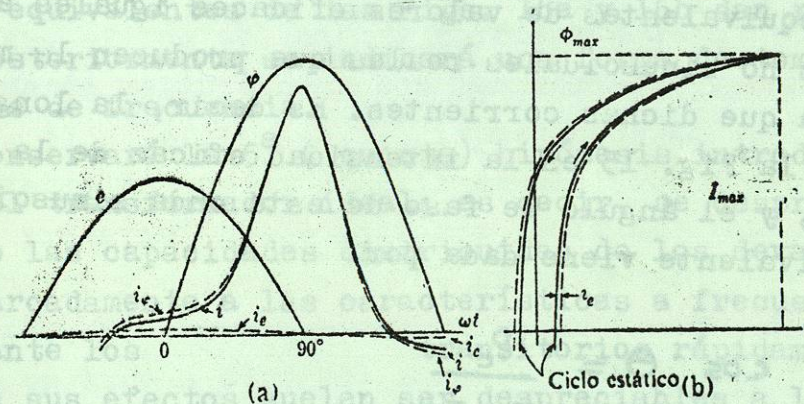


Fig. 14 Construcción gráfica para la determinación de la corriente de excitación.

La aplicación del análisis de Fourier a la onda no sinusoidal de la corriente de excitación arroja el siguiente resultado:

"La corriente de excitación puede descomponerse en dos componentes fundamentales. Una de las componentes está en fase con la Fcem autoinducida (E_1) y la otra componente está en fase con el flujo principal (Φ)". (Para una demostración rigurosa véase: E.E. Staff del M.I.T., CIRCUITOS MAGNETICOS Y TRANSFORMADORES, Ed. Reverté, Buenos Aires 1980, pp 163). En un diagrama fasorial:

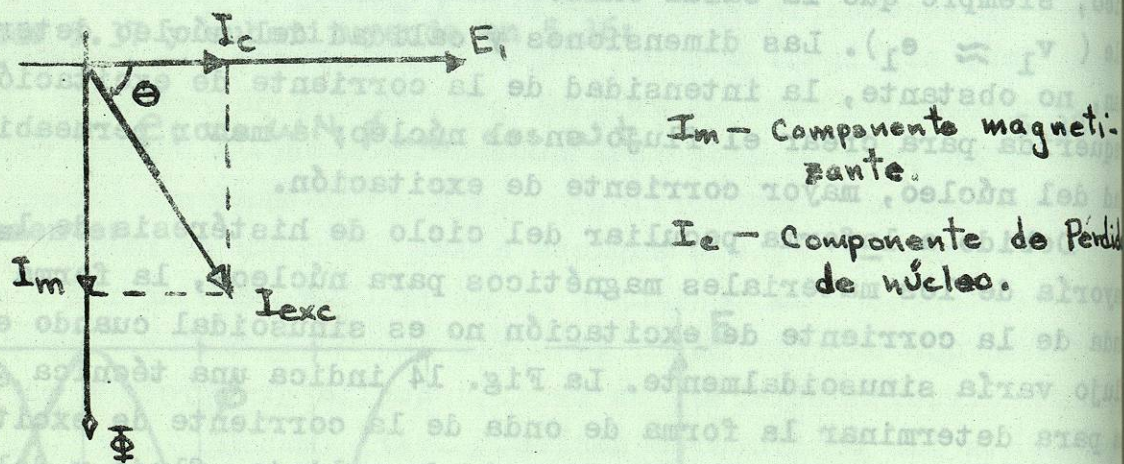


Fig. 15

Los fasores I_m e I_{exc} no representan más que intensidades sinusoidales equivalentes de valores eficaces iguales a los de las corrientes no sinusoidales reales que producen la misma potencia media que dichas corrientes. Es decir, la longitud del fador I_{exc} de la Fig. 15 es la intensidad eficaz de la corriente de excitación, y el ángulo de fase de esta onda sinusoidal de corriente equivalente viene dada por

$$\cos \theta = \frac{P_c}{E_1 I_{exc}} \quad 5.40$$

donde P_c es la pérdida en el núcleo y E_1 e I_{exc} son los valores eficaces que se leerían en instrumentos de medida ordinarios para C.A.

De la Fig. 15 se concluye que la rama de excitación puede representarse en un circuito equivalente como una impedancia de tipo inductivo, conectada de tal forma que en sus terminales aparezca la Fcem inducida en el devanado por el flujo principal. La Fig. 16 indica dos formas de representar a dicha impedancia.

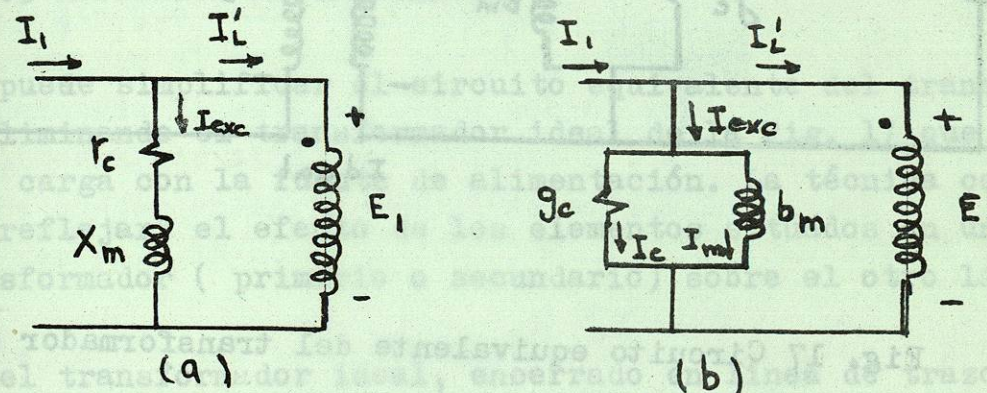


Fig. 16

Donde r_c o g_c representan las pérdidas de núcleo y X_m o b_m representan la componente de magnetización. En la Fig. 16a se representa la rama de excitación como una impedancia y en la Fig. 16b se le representa como una admitancia; ambas son equivalentes. Si varía la frecuencia, y si se supone que las resistencias r_c y g_c son constantes y que los elementos de circuito X_m y b_m tienen coeficientes de autoinducción constantes, los circuitos equivalentes de las Figs. 16a y 16b dan resultados diferentes. Posteriormente se indicará una forma de tomar en cuenta los cambios de frecuencia.

Se conservará la 5ª (quinta) hipótesis introducida en el estudio del transformador ideal; es decir, se despreciarán los efectos de las capacidades distribuidas de los devanados. Pueden afectar marcadamente a las características a frecuencias elevadas y durante los transitorios rápidamente variables, pero sus efectos suelen ser despreciables a las frecuencias utilizadas en los sistemas de potencia y a las audiodfrecuencias suficientemente bajas.

Finalmente, el circuito equivalente del transformador toma la siguiente forma:

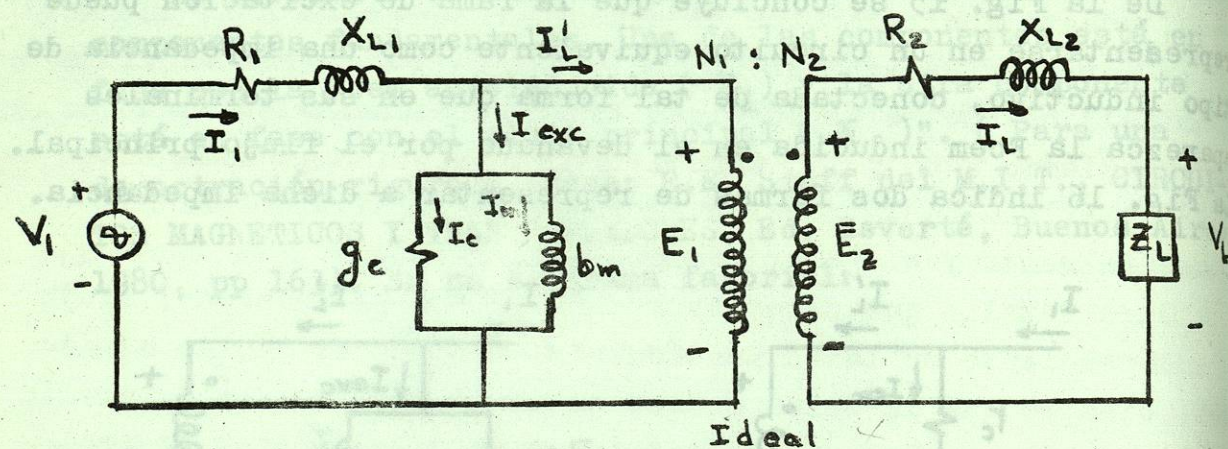


Fig. 17 Circuito equivalente del transformador real.

I_L' es la corriente de entrada al transformador ideal. Esta corriente es igual a cero cuando la corriente de carga vale cero y se le denomina componente de carga o corriente de carga referida al primario. Pueden plantearse las siguientes ecuaciones a partir del circuito equivalente de la Fig. 17:

$$V_1 = I_1 (R_1 + jX_{L1}) + E_1 \quad 5.41$$

$$E_2 = I_L (R_2 + jX_{L2}) + V_L \quad 5.42$$

$$I_1 = I_{exc} + I_L' \quad 5.43$$

$$I_{exc} = I_c + I_m \quad 5.44$$

$$\frac{N_1}{N_2} = a \quad 5.45$$

$$\frac{E_1}{E_2} = \frac{N_1}{N_2} = a \quad 5.46$$

$$\frac{I_L'}{I_L} = \frac{N_2}{N_1} = \frac{1}{a} \quad 5.47$$

$$\frac{E_1}{E_2} = \frac{I_L}{I_L'} \quad 5.48$$

5.4.3 REFLEXION DE IMPEDANCIAS

Se puede simplificar el circuito equivalente del transformador, eliminando el transformador ideal de la Fig. 17 que acopla a la carga con la fuente de alimentación. La técnica consiste en "reflejar" el efecto de los elementos situados en un lado del transformador (primario o secundario) sobre el otro lado de éste.

En el transformador ideal, encerrado en línea de trazos en la Fig. 17, la corriente que sale en el lado 2 se refleja como una corriente que entra en el lado 1, de la Ec. 5.47:

$$I_L' = \frac{I_L}{a}$$

En forma similar, el voltaje inducido E_1 se refleja en el lado 2 como un voltaje E_2 , de la Ec. 5.46:

$$E_1 = aE_2 = aE_2'$$

De aquí que, si los voltajes y corrientes de un lado del transformador están relacionados con los voltajes y corrientes del otro lado, el efecto de las impedancias lo estará también. Así, el efecto de una impedancia en el secundario, sobre el circuito del primario, puede lograrse retirando dicha impedancia del secundario y colocando en el primario una impedancia de valor adecuado. El criterio para reflejar (o "referir") los elementos de un lado a otro del transformador ideal, radica en que la potencia disipada por una impedancia deberá ser la misma que