Universidad Tecnológica Nacional
Facultad Regional Reconquista

Ingeniería Electromecánica

Año: 4° Diseño Curricular: 2004 - Ordenanza N°1029

Máquinas eléctricas

Resumen de transformadores

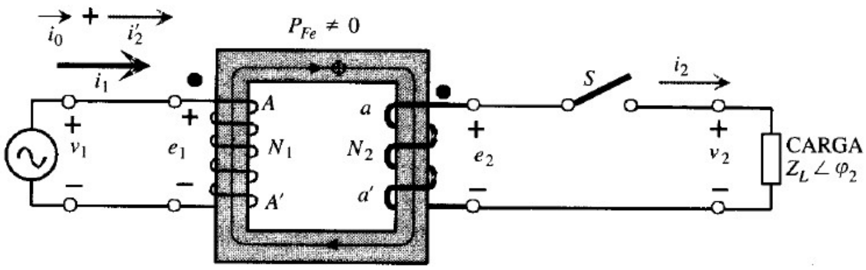
Alumno:

Faulkner Melani
Franzoi Valentín
Guardiani Franco
Polo Daiana

1. Principio de funcionamiento de un transformador ideal

Para el análisis se toma que el transformador está alimentado por el lado de alta (el de + espiras) y trabaja como un reductor. Es decir que:
1) El primario trabaja como un recepto respecto a la fuente. (recibe I)
2) El secundario se comporta como un generador respecto a la carga conectada a sus bordes. (Entrega I)
Para un transformador ideal no existen pérdidas por Histéresis y corrientes parásitas y no existen flujos de dispersión (todo el flujo magnético enlaza al primario y secundario).

1.1. Transformador ideal sin carga



Realmente e_1 representa una f.c.e.m porque se opone a v_1 y limita la corriente de primario. La polaridad e_2 tiene en cuenta que, al cerrar el circuito,[1] la corriente i_2 debe generar un flujo que se oponga el flujo primario que la originó. Es decir que, *la f.m.m del secundario actúa en contra de la f.m.m primaria produciendo un efecto desmagnetizante sobre ésta.*
Aplicando la 2° Ley de Kirchhoff al transformador ideal tenemos que:

$$v_1 = e_1 = N_1 \frac{d\Phi}{dt} \quad ; \quad e_2 = v_2 = N_2 \frac{d\Phi}{dt}$$

Si se parte de un flujo **senoidal** de la forma:

$$\Phi = \Phi_m \operatorname{sen} \omega t = \Phi_m \cos(\omega t - 90°)$$

Haciendo la derivada del flujo y reemplazando en **??** tenemos:

$$v_1 = e_1 = N_1 \omega \Phi_m \cos \omega t \quad ; \quad e_2 = v_2 = N_2 \omega \Phi_m \cos \omega t$$

Comparando el flujo expresado en coseno y los voltajes podemos ver que los últimos van 90° adelantados respecto al flujo. Si calculamos sus **valores eficaces**:

$$V_1 = E_1 = \frac{N_1 \omega \Phi_m}{\sqrt{2}} = 4{,}44\, f N_1 \Phi_m$$
$$V_2 = E_2 = \frac{N_2 \omega \Phi_m}{\sqrt{2}} = 4{,}44\, f N_2 \Phi_m$$

Dividiendo entre sí las ecuaciones y simplificando resulta:

[1]Porque si está abierto, sólo hay V, **no I**

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

donde el factor *m* se denomina **relación de transformación**.
Si el transformador está en **vacío** o **sin carga**, las pérdidas en el hierro P_{Fe} en el núcleo del transformador será:

$$P_{Fe} = V_1 \, I_0 \, cos \, \phi_0 \tag{1}$$

donde V_1 y I_0 representa los valores eficaces de la tensión y la corriente.
La corriente de vacío I_0 tiene dos componentes: una activa I_{Fe} y una reactiva I_μ

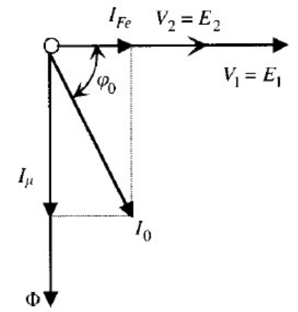


Figura 3.11. Diagrama fasorial de tensiones y corrientes en vacío.

1.2. Transformador ideal con carga

Si cerramos el interruptor S, el transformador funciona **en carga** y aparece una corriente i_2 que circula por el secundario.

$$\mathbf{I}_2 = \frac{\mathbf{E}_2}{\mathbf{Z}_L} = \frac{E_2 \angle 0^\circ}{Z_L \angle \varphi_2} = \frac{E_2}{Z_L} \angle -\varphi_2$$

La corriente $\mathbf{I_2}$ se retrasa ϕ_2 de la f.e.m $\mathbf{E_2}$
La corriente i_2 en el secundario produce una f.m.m. desmagnetizante $N_2 i_2$ que se opone a la f.m.m primaria $N_1 i_0$. Para que el flujo no se vea reducido por este efecto , en el primario se genera una corriente adicional primaria i_2' con una f.m.m equivalente:

$$N_1 i_2' = N_2 i_2$$

de donde se deduce el valor de la corriente i_2' adicional primaria:

$$i_2' = \frac{N_2}{N_1} i_2 = \frac{i_2}{m} \quad ; \quad m = \frac{N_1}{N_2}$$

La corriente total necesaria en el primario i_1 será igual a:

$$i_1 = i_0 + i_2' = i_0 + \frac{i_2}{m}$$

La ecuación nos indica que la corriente primaria i_1 tiene dos componentes:

- **Una corriente de excitación o de vacío $\mathbf{I_0}$** que produce el flujo en el núcleo magnético y vence las pérdidas en el hierro a través de sus componentes I_μ y I_{Fe}.
- **Una componente de carga $\mathbf{I'_2}$** que equilibra o contrarresta la acción desmagnetizante de la f.m.m secundaria para que el flujo en el núcleo permanezca constante e independiente de la carga. Esta se denomina **corriente secundaria reducida**.

A plena carga la corriente $\mathbf{I'_2}$ es 20 veces por lo menos mayor que $\mathbf{I_0}$ por lo que puede despreciarse y la ecuación queda:

$$\mathbf{I}_1 \approx \mathbf{I}'_2 = \frac{\mathbf{I}_2}{m}$$

2. Funcionamiento de un transformador real

En el análisis de un trafo real se tiene en cuenta la resistencias R_1 y R_2 de los arrollamientos y los flujos de dispersión Φ_{d1} y Φ_{d2} que se cierran en el aire.
Si consideramos los flujos de dispersión desaparece la idea del flujo común único que existía en el transformador ideal. Si tomamos que Φ_1 y Φ_2 son los flujos totales que atraviesan los devanados primario y secundario y Φ es el flujo común a ambos se cumplirá:

$$\Phi_1 = \Phi + \Phi_{d1} \quad ; \quad \Phi_2 = \Phi + \Phi_{d2}$$

Para representar estas pérdidas agregamos las resistencias R_1 y R_2 y dos bobinas adicionales con núcleo de aire que representan los flujos de dispersión Φ_{d1} y Φ_{d2} donde se han indicado con L_{d1} y L_{d2} son los coeficientes de autoinducción, cuyos valores serán:

$$L_{d1} = N_1 \frac{d\Phi_{d1}}{di_1} \quad ; \quad L_{d2} = N_2 \frac{d\Phi_{d2}}{di_2}$$

y que dan lugar a las reactancias de dispersión X_1 y X_2 de ambos devanados:

$$X_1 = L_{d1}\omega \quad ; \quad X_2 = L_{d2}\omega$$

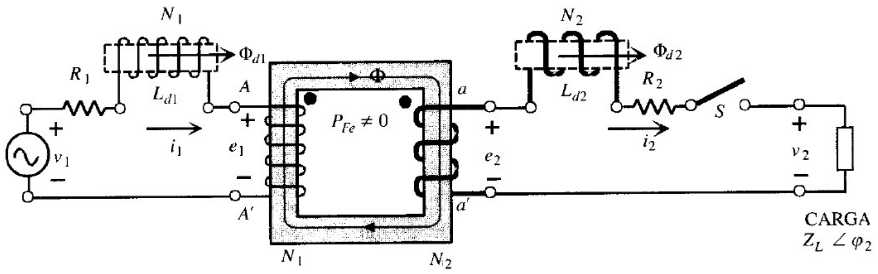


Figura 3.13. Transformador real con bobinas ideales en el núcleo.

La aplicación del 2° Ley de Kirchhoff a los circuitos primario y secundario nos da:

$$v_1 = e_1 + R_1 i_1 + L_{d1}\frac{di_1}{dt} \quad ; \quad e_2 = v_2 + R_2 i_2 + L_{d2}\frac{di_2}{dt}$$

Las ecuaciones para calcular V_1 y V_2 quedan:

$$\mathbf{V_1 = E_1 + R_1\, I_1 + j\, X_2\, I_2} \quad ; \quad \mathbf{V_2 = E_2 - R_2\, I_2 - jX_2\, I_2} \tag{2}$$

Como se puede apreciar, las caídas de tensión V_1 y V_2 no son iguales a E_1 y E_2 por lo tanto la relación de transformación para trafos reales queda:

$$\frac{E_1}{E_2} = \frac{N_1}{N_2} = m \tag{3}$$

En los transformadores industriales la caída de tensión provocada por el cobre son muy pequeñas por lo que podemos decir:

$$V_1 \approx E_1 \quad V_2 \approx E_2 \quad \therefore \quad \frac{V_1}{V_2} \approx m \tag{4}$$

Si el transformador trabaja en **vacío**, $I_2 = 0$ por lo tanto las ecuaciones quedan:

$$\mathbf{V_1 = E_1 + R_1\, I_0 + jX_1\, I_0} \quad ; \quad \mathbf{V_2 = E_2} \tag{5}$$

Las caídas de tensiones en vacío son muy pequeñas por lo tanto:

$$V_1 = E_1 \quad ; \quad V_{20} = E_2 \quad \therefore \quad m = \frac{V_1}{V_{20}} = \frac{E_1}{E_2} = \frac{N_1}{N_2} \tag{6}$$

Este cociente con la tensión secundaria en vacío es el que incluye el fabricante en la placa características de la máquina. La ecuación $\mathbf{I_1 = I_0 + \frac{I_2}{m}}$ es válida a todos los efectos.

3. Circuito equivalente de un transformador

Para el desarrollo de un circuito equivalente de un transformador se inicia **reduciendo** ambos devanados al mismo número de espiras. Si reducimos el secundario al primario, entonces $N_1 = N_2'$. Para que este nuevo transformador sea equivalente al original *deben conservarse las potencias activa y reactiva* y su distribución en los distintos elementos del circuito secundario.

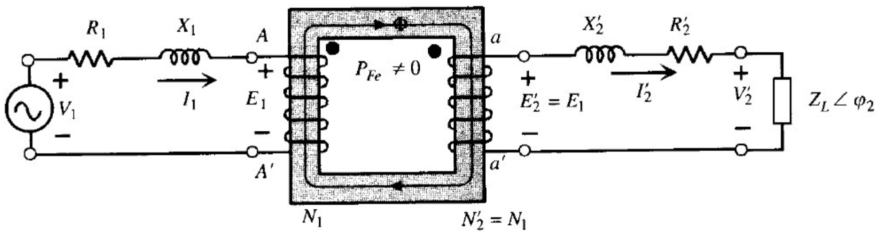


Figura 1: Circuito equivalente de un transformador real reducido al primario

a) F.e.m.s y tensiones

Si $N_2' = N_1 \;\therefore\; \frac{E_1}{E_2'} = \frac{N_1}{N_2'} = 1 \Rightarrow \boxed{E_2' = E_1 = m\, E_2 \;\wedge\; V_2' = m\, V_2}$

b) Corrientes

Como la potencia aparente en ambos secundarios se conserva $S_2 = V_2\, I_2 = V_2'\, I_2'$ reemplazando $V_2' = m\, V_2$ queda:

$$I_2' = \frac{I_2}{m} \tag{7}$$

c) Impedancias

Como la potencia activa se conserva $R_2\, {I_2}^2 = R_2'\, {I_2'}^2$ reemplazando $I_2' = \dfrac{I_2}{m}$ se tiene:

$$R_2' = m^2\, R_2 \tag{8}$$

Lo mismo sucede con la potencia reactiva por lo tanto:

$$X_2' = m^2\, X_2 \tag{9}$$

Entonces para una impedancia $Z_L' = m^2\, Z_L$

La importancia fundamental de la reducción de los devanados es obtener una representación del transformador donde no exista una relación de transformación porque $N_1 = N_2'$ y sustituir los devanados acoplados magnéticamente por otros **acoplados sólo eléctricamente**.