

De cualquier manera, el valor de  $R_2'$  debe ser muy aproximado al de  $R_1$ , para un transformador bien diseñado.

La impedancia de entrada estará dada por:

$$Z_{cc} = \frac{V_{cc}}{I_{cc}} = \sqrt{(R_1 + R_2')^2 + (X_{L1} + X_{L2}')^2}$$

$$X_{L1} + X_{L2}' = \sqrt{\left(\frac{V_{cc}}{I_{cc}}\right)^2 - (R_1 + R_2')^2} \quad 6.3$$

En este caso, nuevamente, no hay forma exacta de separar  $X_{L1}$  y  $X_{L2}'$ . Deberá aplicarse cualquiera de los dos criterios mencionados anteriormente: considerar que  $X_{L1}$  y  $X_{L2}'$  son iguales, o considerar que la relación entre ellas es igual a la relación entre las resistencias a la corriente directa:

$$\frac{R_{1cd}}{R_{2cd}} = \frac{X_{L1}}{X_{L2}} \Rightarrow X_{L1} = \left(\frac{R_{1cd}}{R_{2cd}}\right) X_{L2} \quad 6.4$$

Hasta este punto se conocen los valores de  $R_1$ ,  $R_2'$ ,  $X_{L1}$  y  $X_{L2}'$ . De la Ec. 5.49, se tiene que

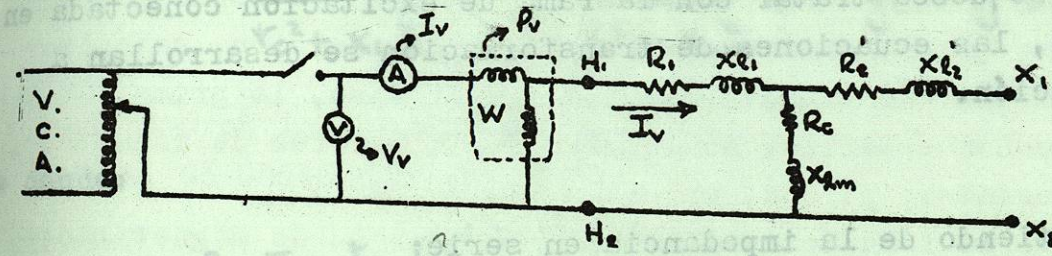
$$X_{L2} = \frac{X_{L2}'}{a^2} \quad \text{y} \quad R_2 = \frac{R_2'}{a^2} \quad 6.5$$

### 6.2 PRUEBA DE VACIO O DE CIRCUITO ABIERTO

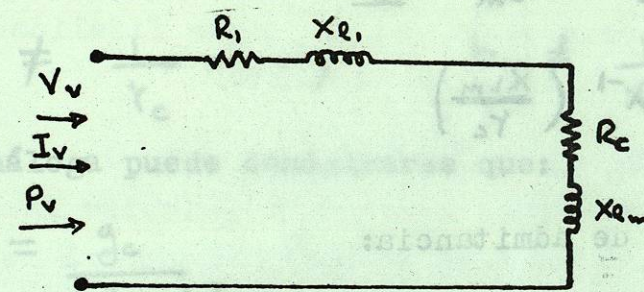
Anteriormente se planteó la conveniencia de realizar esta prueba alimentando el lado "de baja" del transformador. Sin embargo, en este análisis se alimentará al transformador del mismo lado que en la prueba de corto circuito, a fin de partir del mismo circuito equivalente. Esta simplificación es permisible ya que se trata de un análisis teórico. En la práctica, simplemente se referirán los parámetros al primario o al secundario según convenga.

En esta prueba se alimenta el voltaje nominal del devanado, manteniendo las terminales del secundario en circuito abierto. Debe tomarse la precaución de aislar correctamente las terminales del secundario, ya que al alimentar el primario con su voltaje nominal, aparecerá en el secundario su propio voltaje nominal.

Se toman lecturas de voltaje, corriente y potencia activa de entrada ( $V_v$ ,  $I_v$ ,  $P_v$ ):



Como no circula corriente por  $R_2'$  y  $X_{L2}'$ , el circuito se simplifica:



La potencia de entrada será disipada por  $R_1$  más  $r_c$ :

$$P_v = I_v^2 (R_1 + r_c) \quad 6.6$$

De aquí:

$$r_c = \frac{P_v}{I_v^2} - R_1 \quad 6.7$$

(Usualmente se desprecia  $R_1$  en las Ecs. 6.6 y 6.7, por ser mucho menor que  $r_c$ )

De la impedancia de entrada:

$$Z_v = \frac{V_v}{I_v} = \sqrt{(R_1 + r_c)^2 + (X_{L1} + X_{Lm})^2}$$

$$X_{Lm} = \sqrt{\left(\frac{V_v}{I_v}\right)^2 - (R_1 + r_c)^2} - X_{L1} \quad 6.8$$

De las Ecs. 6.7 y 6.8 se determinan los valores de  $r_c$  y  $X_{Lm}$ . Si se desea tratar con la rama de excitación conectada en paralelo, las ecuaciones de transformación se desarrollan a continuación.

xxx

Partiendo de la impedancia en serie:

$$Z_{exc} = r_c + jX_{Lm}$$

En forma polar:

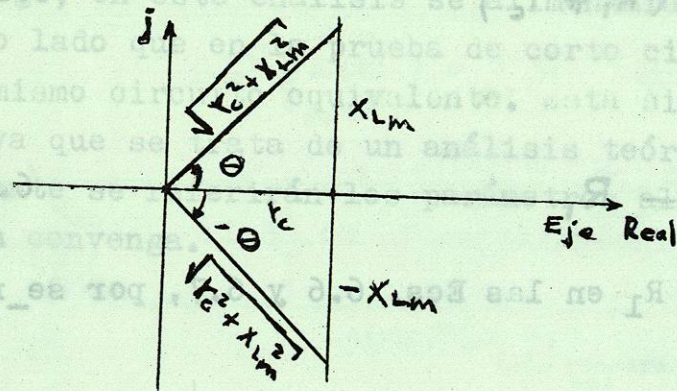
$$Z = \sqrt{r_c^2 + X_{Lm}^2} \angle \theta$$

$$\theta = \tan^{-1} \left( \frac{X_{Lm}}{r_c} \right)$$

De la definición de admitancia:

$$Y = \frac{1}{Z} = \frac{1}{\sqrt{r_c^2 + X_{Lm}^2}} \angle -\theta$$

Los ángulos  $\theta$  y  $-\theta$  se definen así:



De la definición de una transformación polar a una rectangular:

$$Y = \frac{1}{\sqrt{r_c^2 + X_{Lm}^2}} [\cos(-\theta) + j \sin(-\theta)]$$

$$Y = \frac{1}{\sqrt{r_c^2 + X_{Lm}^2}} \left[ \frac{r_c}{\sqrt{r_c^2 + X_{Lm}^2}} - j \frac{X_{Lm}}{\sqrt{r_c^2 + X_{Lm}^2}} \right]$$

$$= \frac{r_c}{r_c^2 + X_{Lm}^2} - j \frac{X_{Lm}}{r_c^2 + X_{Lm}^2} = g_c - j b_m$$

De donde:

$$g_c = \frac{r_c}{r_c^2 + X_{Lm}^2} \quad 6.9$$

$$b_m = \frac{X_{Lm}}{r_c^2 + X_{Lm}^2} \quad 6.10$$

Nótese que, en general,

$$g_c \neq \frac{1}{r_c} \quad \text{y} \quad b_m \neq \frac{1}{X_{Lm}}$$

En forma análoga puede demostrarse que:

$$r_c = \frac{g_c}{g_c^2 + b_m^2} \quad 6.11$$

$$X_{Lm} = \frac{b_m}{g_c^2 + b_m^2} \quad 6.12$$

xxx

Utilizando el resultado de la Ec. 6.12:

$$L'_m = \frac{X_{Lm}}{\omega}$$

Utilizando el resultado de la Ec. 6.10 y la definición de susceptancia:

$$L_m'' = \frac{1}{\omega b_m}$$

Nótese que, en general,  $L_m' \neq L_m''$ .

$L_m'$  o  $L_m''$  se definen como la inductancia de magnetización.  $L_m''$  es la inductancia de la rama de magnetización, calculada a partir de la susceptancia de magnetización.  $L_m'$  es la inductancia de la rama de magnetización, calculada de la reactancia de magnetización. En este caso, la prima ( ' ) no indica valor referido. Nótese que ambos valores de inductancia son diferentes, ya que, en general,  $b_m \neq X_{Lm}$ .

La finalidad de calcular la inductancia de magnetización consiste en poder determinar la corriente de excitación para frecuencias algo distintas a las que fueron determinadas las pruebas. Como las pérdidas de núcleo y la corriente magnetizante dependen de la frecuencia, la técnica consiste simplemente en suponer constantes  $L_m'$  o  $L_m''$  y en hacer proporcionales a la frecuencia los valores de  $r_c$  o  $g_c$ , de tal manera que el circuito equivalente siga representando con la mayor fidelidad el comportamiento real del transformador. Entonces:

$$X_{Lm} = \omega L_m' \quad 6.13$$

$$b_m = \frac{1}{\omega L_m''} \quad 6.14$$

$$g_c = \frac{1}{\omega R''} \quad 6.15$$

$$r_c = \omega R' \quad 6.16$$

Donde  $L_m'$ ,  $L_m''$ ,  $R'$  y  $R''$  son los coeficientes de proporcionalidad que relacionan a los parámetros de la rama de excitación con la frecuencia. Sin embargo, se aclara que no es usual el determinar los parámetros del transformador a una frecuencia

distinta a la nominal; pero el conocimiento profundo de un concepto es el que da criterio para aplicarlo.

En algunas ocasiones, en lugar de los parámetros de la rama de excitación de un transformador, se presenta una tabla relacionando el voltaje aplicado en vacío (igual a  $E$  en este caso) con la corriente y pérdidas de núcleo en vacío. En tal caso, los valores de la corriente de excitación y las pérdidas de núcleo se obtienen directamente por interpolación, para valores de tensión inducida ( $E$ ) intermedios a los tabulados.

#### EJEMPLO 1

Se tomaron los siguientes datos de un transformador de 1 000 KVA, 66 000:6 600 V, 60 Hz:

Prueba	Potencia	Voltaje	Corriente
Terminales de baja voltaje en C.C.	7 490 W	3 240 V	15.2 A
Terminales de alto voltaje en C.A.	9 300	6 600	9.1

Considérese que las resistencias del primario y secundario son iguales al referirlas al mismo lado. Tómese la misma consideración para las reactancias de dispersión. Calcular los parámetros del circuito equivalente del transformador. (Nótese que en la prueba de corto circuito se alimentó el lado de alta y en la prueba de vacío se hizo lo propio en el lado de baja, como es recomendable).

$$I_{n \text{ Alta}} = \frac{1\ 000 \text{ KVA}}{66 \text{ KV}} = 15.2 \text{ Amp.}$$

$$V_{n \text{ baja}} = 6\ 600 \text{ V}$$