ANÁLISIS Y FUNCIONAMIENTO DE MÁQUINAS ELÉCTRICAS	3º de Grado en Ingeniería en Tecnología Industrial
	Curso 2013-14

Primer Parcial — 25 de enero de 2014

EJERCICIOS

XVIII.- Un transformador de potencia monofásico presenta las siguientes características nominales:

24 kV / 6 kV , 4800 kVA, 50 Hz

Se sabe por el fabricante que el transformador, alimentado a su tensión nominal, presenta un índice de rendimiento máximo de 0.75.

Tras realizar varias pruebas sobre el transformador se observa que:

- Cuando el transformador es sometido a un ensayo de cortocircuito al 80% de la intensidad nominal, se mide en dicho ensayo una potencia consumida de 30.72 kW.
- Cuando el transformador está conectado a su tensión nominal y alimenta una carga inductiva pura de 2400 kVA, la caída de tensión en el transformador es del 3%.

Con estos datos se pide:

101.- Calcular las pérdidas internas del transformador en condiciones de rendimiento máximo, cuando el transformador se conecta a una red de 24 kV y 50 Hz.

Las pérdidas internas del transformador son:

$$\mathrm{Perd} = P_{Fe} + P_{Cu}$$

En condiciones de rendimiento máximo:

$$P_{Fe} = P_{Cu} \qquad \Rightarrow \qquad (\mathrm{Perd})_{rend\,max} = 2\cdot(P_{Cu})_{rend\,max}$$

Como las pérdidas en los conductores son directamente proporcionales al cuadrado del índice de carga:

$$(P_{Cu})_{rend\,max} = (P_{Cu})_{i=0,75} = (P_{Cu})_{i=0,80}\cdot\left(\frac{0,75}{0,80}\right)^2 = 30,72\cdot\left(\frac{0,75}{0,80}\right)^2 = 27\ \mathrm{kW}$$

Por tanto:

$$\boxed{(\mathrm{Perd})_{rend\,max} = 54\ \mathrm{kW}}$$

102.- Calcular la intensidad de cortocircuito accidental que circula por el secundario del transformador cuando el transformador se conecta a una red de 24 kV y 60 Hz.

La expresión de Arnold es:

$$u = i(u_R \cdot \cos\varphi + u_X \cdot \text{sen}\varphi) + \frac{i^2}{200}(u_X \cdot \cos\varphi - u_R \cdot \text{sen}\varphi)^2$$

Particularizada para el caso de la carga inductiva pura del enunciado se tiene que:

$$u = 3\ \%$$

$$i = \frac{S}{S_N} = \frac{2400}{4800} = 0{,}5$$

$$u_R = \omega_J = \frac{(W_{CC})_{i=1}}{S_N}100 = \frac{(P_{Cu})_{i=1}}{S_N}100 = \frac{(P_{Cu})_{i=0,8} \cdot \left(1/0{,}8\right)^2}{S_N}100 = \frac{30{,}72 \cdot \left(1/0{,}8\right)^2}{4800}100 = 1\ \%$$

$$\cos\varphi = 0\ \text{(inductivo)} \quad \Rightarrow \quad \text{sen}\varphi = +1$$

Con todo ello, se puede despejar el valor de u_X que resulta ser:

$$u_X = 5{,}997\ \%$$

A partir de aquí se pueden hallar los valores de la resistencia y reactancias equivalentes referidas a 50 Hz. Por ejemplo, referido al primario (para 50 Hz):

$$u_R = \frac{I_{1N} \cdot R_e}{V_{1N}}100$$

$$R_e = \frac{V_{1N} \cdot u_R}{I_{1N} \cdot 100} = \frac{24000 \cdot 1}{200 \cdot 100} = 1{,}2\ \Omega \qquad \left(\text{ya que } I_{1N} = \frac{S_N}{V_{1N}} = \frac{4800}{24} = 200\ \text{A}\right)$$

$$u_X = \frac{I_{1N} \cdot X_e}{V_{1N}}100$$

$$X_e = \frac{V_{1N} \cdot u_X}{I_{1N} \cdot 100} = \frac{24000 \cdot 5{,}997}{200 \cdot 100} = 7{,}196\ \Omega$$

La impedancia equivalente referida a 60 Hz es:

$$[Z_e]_{60\,\text{Hz}} = \sqrt{(R_e)^2 + \left(\frac{60}{50} \cdot X_e\right)^2} \qquad \Rightarrow \qquad [Z_e]_{60\,\text{Hz}} = 8{,}719\ \Omega$$

Considerando el circuito equivalente en situación de cortocircuito:

$$I_{2CC\ \text{accidental}} = a \cdot I_{1CC\ \text{accidental}} = a \cdot \frac{V_{1N}}{[Z_e]_{60\,\text{Hz}}} = \left(\frac{24}{6}\right) \cdot \left(\frac{24000}{8{,}719}\right)$$

$$\boxed{I_{2CC\ \text{accidental}} = 11{,}01\ \text{kA}}$$

103.- Calcular la tensión que se debería aplicar al transformador en la realización de un ensayo de cortocircuito con alimentación por el lado de BT al 60% de la intensidad nominal (frecuencia de 50 Hz).

La tensión de cortocircuito del transformador es la que hace circular la intensidad nominal en el ensayo de cortocircuito. Por tanto, el 60 % de la tensión de cortocircuito hará circular el 60 % de la intensidad nominal.

$$u_Z = \frac{(V_{1CC})_{I_N}}{V_{1N}} 100 = \frac{(V_{2CC})_{I_N}}{V_{2N}} 100 \quad \Rightarrow \quad (V_{2CC})_{0,6 \cdot I_N} = 0,6 \cdot \frac{u_Z \cdot V_{2N}}{100}$$

En este caso:

$$u_Z = \sqrt{u_R^2 + u_X^2} = \sqrt{1^2 - 5,997^2} = 6,082 \ \%$$
$$V_{2N} = 6 \ \text{kV}$$

Con lo que: $$\boxed{(V_{2CC})_{0,6 \cdot I_N} = 218,9 \ \text{V}}$$

104.- Calcular la tensión que se debería aplicar al transformador para que pudiera alimentar a la tensión nominal (6 kV, 50 Hz) una carga de 4000 kVA con factor de potencia 0.8 capacitivo (frecuencia de 50 Hz).

Como el dato es la tensión secundaria y la incógnita es la tensión primaria se resuelve mediante la ecuación vectorial. Si se emplean magnitudes referidas a AT:

$$\underline{V}_1 = \underline{V}_2' + \underline{I}_2' \cdot (R_e + jX_e)$$

Situando la tensión secundaria en la referencia de 0° $\Rightarrow$ $\underline{V}_2' = a \cdot V_{2N} \underline{|0^\circ} = 24000 \underline{|0^\circ}$

La intensidad, por ser carga capacitiva, estará adelantada respecto a la tensión el ángulo de la carga. Por tanto:

$$I_2' = \frac{S}{V_2'} = \frac{4000}{24} = 166,67 \ \text{A} \quad \Rightarrow \quad \underline{I}_2' = 166,67 \ \underline{|36,87^\circ}$$

La impedancia equivalente del transformador es:

$$\underline{Z}_e = (R_e + jX_e) = (1,2 + j \cdot 7,196) \ \Omega = 7,2953 \ \underline{|80,53^\circ}$$

Sustituyendo se obtiene la tensión primaria.

$$\underline{V}_1 = 23465,29 \ \underline{|2,64^\circ} \quad \Rightarrow \quad \boxed{V_1 = 23,46 \ \text{kV}}$$

XIX.- La Figura 1 representa una instalación industrial que se alimenta desde una línea trifásica equilibrada que mantiene constantes sus valores de tensión (30 kV) y frecuencia (50 Hz).

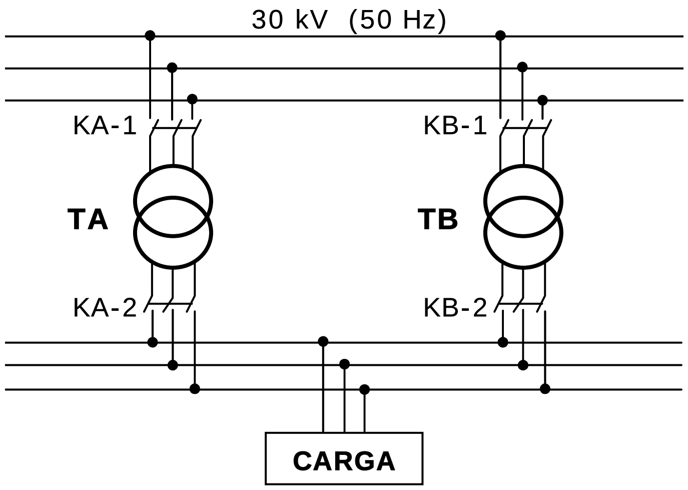


Figura 1

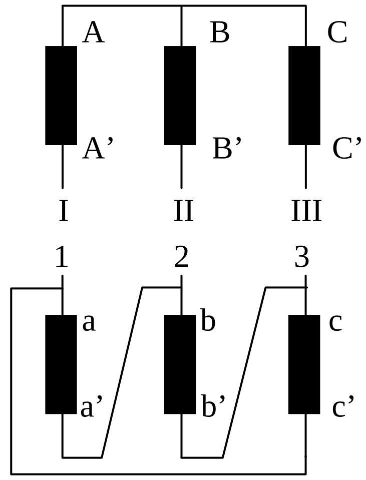


Figura 2

La placa de características de los transformadores TA y TB contienen la siguiente información:

TA	30/6 kV	50 Hz	3 MVA
TB	30/6 kV	50 Hz	5 MVA

Las impedancias equivalentes de los transformadores TA y TB tienen unos valores de (R/X) tan pequeños que, a efectos de cálculo, se puede considerar que las resistencias equivalentes de TA y TB tienen valor nulo.

El esquema de conexiones de ambos transformadores es el mostrado en la Figura 2.

A lo largo de las 24 horas de un día, el valor de la carga y el estado de los interruptores son los mostrados en la Tabla-I

	Valor de la carga equilibrada		Estado de los interruptores			
	MVA	cos φ	KA-1	KA-2	KB-1	KB-2
de 0:00 a 8:00	2.46	0.85 (ind)	ON	ON	OFF	OFF
de 8:00 a 16:00	**¿...?**	0.82 (ind)	ON	ON	ON	ON
de 16:00 a 24:00	5.5	0.88 (ind)	ON	ON	ON	ON

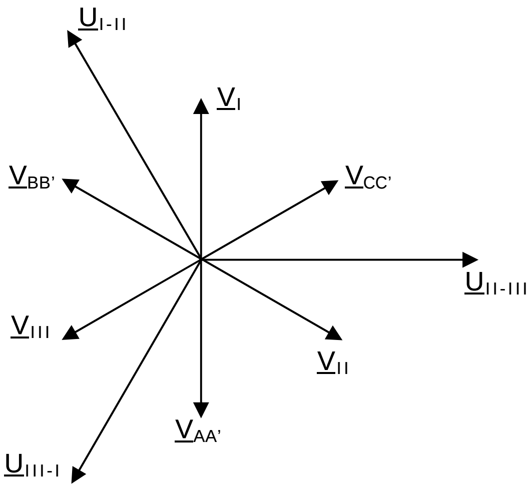
Tabla-I

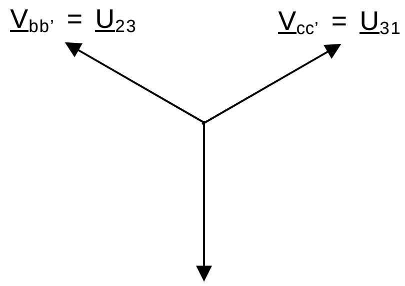
Los aparatos de medida existentes en la instalación permiten conocer que:

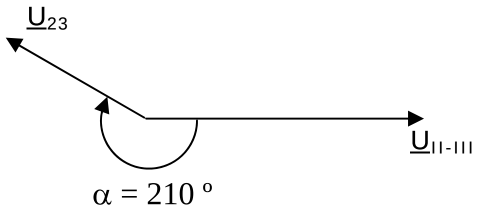
A las 6:00 la tensión en bornes de la carga es de 5840 V.
A las 12:00 el transformador TA transmite una potencia de 2.8 MVA a la carga
A las 18:00 el transformador TA transmite una potencia de 2.34 MVA a la carga.

Se pide calcular:

105.- Indice horario de los transformadores







Indice Horario = 210/30 $\Rightarrow$ $\boxed{\text{IH} = 7}$

El enunciado indica que se puede considerar que la resistencias equivalentes de los transformadores tienen valor nulo. Esto significa que:

$$R_{eTA} = R_{eTB} = 0 \quad \Rightarrow \quad u_{RTA} = u_{RTB} = 0 \quad \Rightarrow \left\{ \begin{matrix} u_{ZTA} = u_{XTA} \\ u_{ZTB} = u_{XTB} \end{matrix} \right\} \Rightarrow \varphi_{eTA} = \varphi_{eTB} = 90^o$$

Por tanto, como las impedancias equivalentes de TA y TB tienen el mismo ángulo, sus intensidades están en fase y se pueden aplicar las ecuaciones de cálculo deducidas en la teoría bajo esta hipótesis.

Para resolver los apartados 106 y 108 no es necesario calcular el valor de las tensiones de cortocircuito (u_Z).

106.- Valor de la carga a las 12:00.

Basta tener en cuenta que la relación entre los índices de carga con que funcionan los transformadores TA y TB es independiente de la carga total que alimentan entre los dos.

$$i_{TA} \cdot u_{ZTA} = i_{TB} \cdot u_{ZTB} \quad \Rightarrow \quad \frac{i_{TA}}{i_{TB}} = \frac{u_{ZTB}}{u_{ZTA}} = \text{cte}$$

A las 18:00

$$\left.\begin{array}{l} S_{TA} = 2{,}34 \ \ MVA \\ S_{CARGA} = 5{,}5 \ \ MVA \end{array}\right\} \Rightarrow S_{TB} = 5{,}5 - 2{,}34 = 3{,}16 \ \ MVA$$

Por tanto, a las 18:00:

$$i_{TA} = \frac{S_{TA}}{S_{NTA}} = \frac{2{,}34}{3} = 0{,}78$$

$$i_{TB} = \frac{S_{TB}}{S_{NTB}} = \frac{3{,}16}{5} = 0{,}632$$

A las 12:00

$$S_{TA} = 2{,}8 \ \ MVA \quad \Rightarrow \quad i_{TA} = \frac{2{,}8}{3} = 0{,}933$$

Como

$$\left[\frac{i_{TA}}{i_{TB}}\right]_{18:00} = \left[\frac{i_{TA}}{i_{TB}}\right]_{12:00} \quad \Rightarrow \quad \frac{0{,}78}{0{,}632} = \frac{0{,}933}{i_{TB}} \quad \Rightarrow \quad i_{TB} = 0{,}756 \quad \Rightarrow S_{TB} = i_{TB} \cdot S_{NTB} = 0{,}756 \cdot 5 = 3{,}78 \ \ MVA$$

Por tanto:

$$[S_{CARGA}]_{12:00} = 2{,}8 + 3{,}78 \qquad \Rightarrow \qquad \boxed{[S_{CARGA}]_{12:00} = 6{,}58 \ \ MVA}$$

107.- Tensión en bornes de la carga a las 12:00

Como la tensión en la carga es única, se puede calcular a través de TA, a través de TB o a través del transformador equivalente a TA y TB. A continuación se presenta el cálculo a través de TA.

$$u = \frac{V_{2\,VACIO} - V_2}{V_{2\,VACIO}} \cdot 100 = \frac{V_{2\,N} - V_2}{V_{2\,N}} \cdot 100 = \frac{6000 - 5840}{6000} \cdot 100 = 2{,}667 \ \ \%$$

A las 6:00 solo trabaja el TA, por tanto:

$$i_{TA} = \frac{S_{TA}}{S_{NTA}} = \frac{S_{CARGA}}{S_{NTA}} = \frac{2{,}46}{3} = 0{,}82$$

$$\cos\varphi = 0{,}85 \ \ (\text{ind}) \quad \Rightarrow \quad \text{sen}\varphi = +0{,}5268$$

Como la resistencia se considera nula, el valor de u_{RTA} es cero. Con ello la expresión de Arnold es:

$$u = i_{TA}\left(u_{XTA} \cdot \text{sen}\varphi\right) + \frac{i_{TA}^2}{200}\left(u_{XTA} \cdot \cos\varphi\right)^2$$

$$2{,}667 = 0{,}82\left(u_{XTA} \cdot 0{,}5268\right) + \frac{0{,}82^2}{200}\left(u_{XTA} \cdot 0{,}85\right)^2 \quad \Rightarrow \quad u_{XTA} = 5{,}973\,\% \quad \Rightarrow \quad u_{ZTA} = 5{,}973\,\%$$

En el apartado anterior se ha calculado que a las 12:00:

$$S_{TA} = 2{,}8 \ \text{MVA} \quad \Rightarrow \quad i_{TA} = \frac{2{,}8}{3} = 0{,}933$$

Además, a las 12:00:

$$\cos\varphi = 0{,}82 \ \text{(ind)} \quad \Rightarrow \quad \text{sen}\varphi = +0{,}5723$$

Sustituyendo en la expresión de Arnold:

$$u = i_{TA}\left(u_{XTA} \cdot \text{sen}\varphi\right) + \frac{i_{TA}^2}{200}\left(u_{XTA} \cdot \cos\varphi\right)^2$$

Se obtiene:

$$u = 3{,}295 \ \% \quad \Rightarrow \quad U = U_{2N} \cdot \left(1 - \frac{u}{100}\right) = 6000 \cdot \left(1 - \frac{3{,}295}{100}\right) \quad \Rightarrow \quad \boxed{U = 5802 \ \text{V}}$$

Como consecuencia del cierre de la instalación industrial, los transformadores son trasladados con el fin de poder ser aprovechados para alimentar otra instalación. En su nueva ubicación los transformadores son acoplados en paralelo y son alimentados desde una línea trifásica equilibrada de 20 kV (50 Hz). Calcular:

108.- Carga máxima que, sin sobrecargas, pueden suministrar entre los dos transformadores en su nueva ubicación.

Para resolver este apartado no es necesario calcular los valores de las tensiones de cortocircuito (u_Z). Basta tener en cuenta que la relación entre los índices de carga con que funcionan los transformadores TA y TB es independiente de la tensión de alimentación, ya que el paso de 30 kV a 20 kV afecta por igual a numerador y denominador.

$$i_{TA} \cdot u_{ZTA} = i_{TB} \cdot u_{ZTB} \quad \Rightarrow \quad \frac{i_{TA}}{i_{TB}} = \frac{u_{ZTB}}{u_{ZTA}} = \text{cte}$$

Las potencias nominales de TA y TB referidas a 20 kV son:

$$\left[S_{NTA}\right]_{20 \ kV} = \left[S_{NTA}\right]_{30 \ kV} \cdot \frac{20}{30} = 3 \cdot \frac{20}{30} = 2 \ \ \text{MVA}$$

$$\left[S_{NTB}\right]_{20 \ kV} = \left[S_{NTB}\right]_{30 \ kV} \cdot \frac{20}{30} = 5 \cdot \frac{20}{30} = 3{,}33 \ \ \text{MVA}$$

Como $i_{TA} > i_{TB}$, la potencia máxima que pueden suministrar se alcanza cuando el TA funcione a plena carga. En ese caso:

$$i_{TA} = 1 \quad \Rightarrow \quad S_{TA} = S_{NTA} = 2 \ \text{MVA}$$

$$\left[\frac{i_{TA}}{i_{TB}}\right]_{30 \ kV} = \left[\frac{i_{TA}}{i_{TB}}\right]_{20 \ kV} \quad \Rightarrow \quad \frac{0{,}78}{0{,}632} = \frac{1}{i_{TB}} \quad \Rightarrow \quad i_{TB} = 0{,}81 \quad \Rightarrow S_{TB} = i_{TB} \cdot S_{NTB} = 0{,}81 \cdot 3{,}33 = 2{,}7 \ \ \text{MVA}$$

Por tanto:

$$S_{CARGA \ MAXIMA} = S_{NTA} + S_{TB} = 2 + 2{,}7 \quad \Rightarrow \quad \boxed{S_{CARGA \ MAXIMA} = 4{,}7 \ \ \text{MVA}}$$