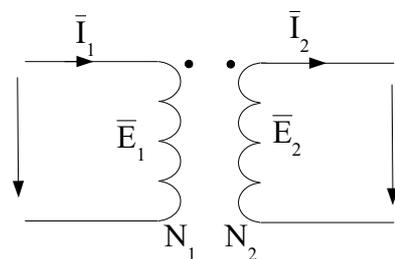


TECNOLOGÍA ELÉCTRICA. UNIDAD DIDÁCTICA 2

CONCEPTOS BÁSICOS A RETENER Y PROBLEMAS RESUELTOS

1.- TRANSFORMADOR IDEAL Y TRANSFORMADOR REAL

- El funcionamiento de un transformador se basa en la Ley de Faraday (la variación periódica de un flujo magnético que atraviesa una bobina genera una f.e.m (E) en ella). Un **transformador ideal** es aquel que no tiene pérdidas y se representa mediante el siguiente circuito equivalente:



Las ecuaciones (en valores eficaces) que representan el circuito son:

$$E_1/E_2 = N_1/N_2 \quad (\text{no existe dispersión de flujo})$$

$$I_1 N_1 = I_2 N_2 \quad (\text{la fuerza magnetomotriz es nula})$$

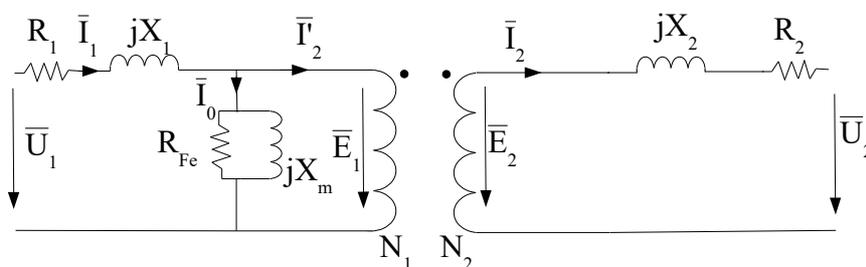
circuito equivalente transformador ideal

A la relación entre el número de espiras de los devanados primario y secundario se le denomina **relación de transformación** (r_t o m , según bibliografía)

$$r_t = N_1/N_2$$

- En los **transformadores reales**:
 - existen pérdidas en el núcleo tanto por histéresis como por las corrientes de Foucault
 - los devanados tienen pérdidas por efecto Joule (resistencias)
 - la permeabilidad del núcleo no es infinita

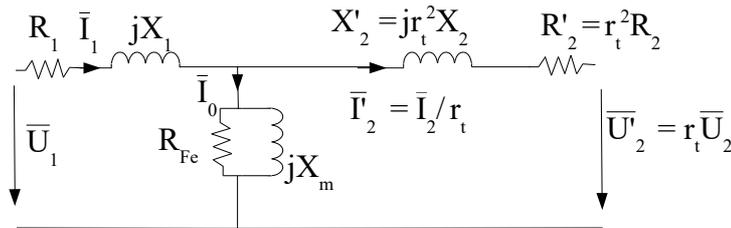
Todos estos aspectos se consideran en la representación del circuito equivalente:



circuito equivalente transformador real

Donde se han representado las pérdidas en los devanados mediante una resistencia y una reactancia (R_1, X_1, R_2, X_2), las pérdidas en el hierro (R_{Fe}) y las pérdidas por magnetización (X_m). I_0 representa la corriente de vacío cuya suma es la corriente de pérdidas en el hierro (I_{Fe}) y la corriente de magnetización (I_m).

Este circuito equivalente también se puede reducir al primario o al secundario empleando la relación de transformación.



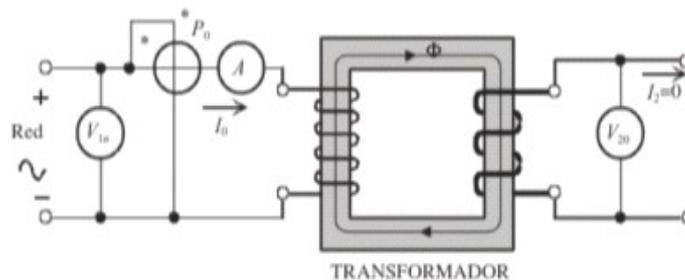
circuito equivalente transformador reducido al primario

2.- ENSAYOS DEL TRANSFORMADOR

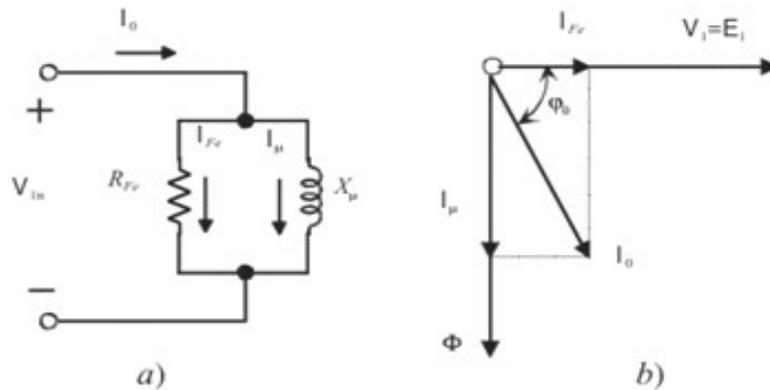
- Los parámetros del circuito equivalente se pueden determinar mediante los **ensayos de vacío y cortocircuito**

ENSAYO DE VACÍO

Procedimiento	Consiste en aplicar al primario la tensión nominal o asignada estando el secundario en circuito abierto
Parámetros medidos	Se mide la potencia absorbida (P_0), la corriente de vacío (I_0) y la tensión en el secundario (V_{20}).
Parámetros a determinar	Pérdidas en el hierro del transformador y los parámetros de la rama en paralelo del circuito equivalente (R_{Fe}, X_m). Relación de transformación ($r_t = V_{1n}/V_{20}$)



esquema del ensayo de vacío (Fuente Máquinas Eléctricas J. Fraile Mora)



circuito equivalente del ensayo de vacío y diagrama fasorial (Fuente Máquinas Eléctricas J. Fraile Mora)

Ejemplo

Se dispone de los siguientes resultados de un ensayo en vacío de un transformador de 20kVA de tensión nominal 2300/230V eficaces:

- Corriente de vacío: $I_0 = 95,5\text{mA}$
- Potencia activa consumida: $P_0 = 176\text{W}$

Determinar la resistencia de pérdidas en el hierro y la inductancia de magnetización.

La potencia activa de vacío se rige por la siguiente expresión:

$$P_0 = V_{1n} I_0 \cos \varphi_0$$

El ensayo nos permite disponer de todos los datos para calcular el ángulo de la impedancia de la carga $R_{Fe} + jX_m$

$$\cos \varphi_0 = 176 / (0,0955 * 2300) = 0,8 \quad \text{luego} \quad \varphi_0 = 36,74^\circ$$

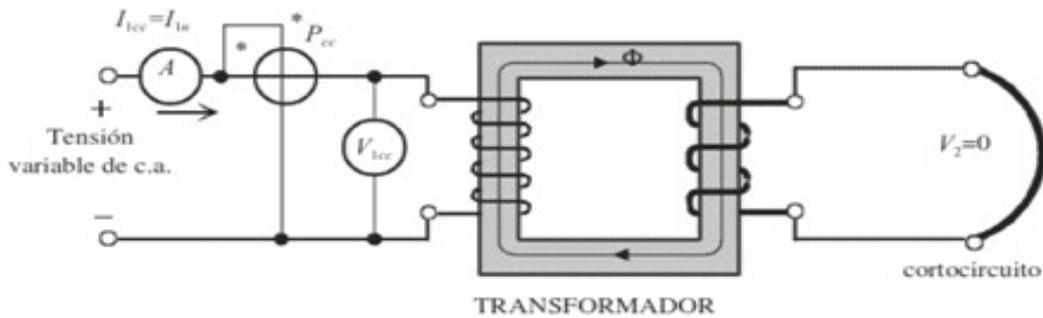
Como

$$\left. \begin{array}{l} R_{Fe} = V_{1n} / I_{Fe} \quad I_{Fe} = I_0 \cos \varphi_0 \\ X_m = V_{1n} / I_m \quad I_m = I_0 \sin \varphi_0 \end{array} \right\} \begin{array}{l} R_{Fe} = V_{1n} / I_0 \cos \varphi_0 = 2300 / (0,0955 * 0,8) = 30105 \, \Omega \\ X_m = V_{1n} / I_0 \sin \varphi_0 = 2300 / (0,0955 * 0,6) = 40140 \, \Omega \end{array}$$

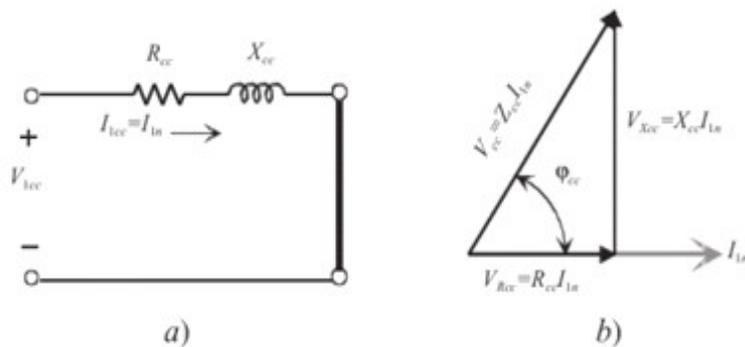
$$Z = 30105 + j40140 \, \Omega$$

ENSAYO DE CORTOCIRCUITO

Procedimiento	Consiste en cortocircuitar el devanado secundario aplicando al primario una tensión que se aumenta hasta que circule por él la intensidad asignada o nominal (o viceversa)
Parámetros medidos	Se mide la tensión del primario (V_{1cc}), la intensidad del primario (I_{1cc}) y la potencia absorbida de cortocircuito (P_{cc}).
Parámetros a determinar	Parámetros de la rama en serie del circuito equivalente (R_{cc} , X_{cc})



esquema del ensayo de cortocircuito (Fuente Máquinas Eléctricas J. Fraile Mora)



circuito equivalente del ensayo de vacío y diagrama fasorial (Fuente Máquinas Eléctricas J. Fraile Mora)

Ejemplo

Se dispone de los siguientes resultados de un ensayo en cortocircuito de un transformador de 20kVA de tensión nominal 2300/230V eficaces:

- Tensión de primario: $V_{1cc} = 73,7 \text{ V}$
- Corriente de primario: $I_{1cc} = 8,6 \text{ A}$
- Potencia activa consumida: $P_{1cc} = 453 \text{ W}$

Determinar las resistencias de pérdidas en el cobre y las inductancias de pérdidas en el flujo (R_1 , X_1 , R'_2 , X'_2).

El módulo de la impedancia de cortocircuito se puede calcular:

$$Z_{cc} = V_{1cc}/I_{1cc} = 73,7/8,6 = 8,56 \Omega$$

A partir de la potencia activa de cortocircuito calculamos el ángulo de la impedancia:

$$P_{cc} = V_{1cc} I_{1cc} \cos \varphi_{cc}$$

$$\cos \varphi_{cc} = 453/(73,7 \cdot 8,6) = 0,71 \quad \text{luego} \quad \varphi_{cc} = 44,38^\circ$$

La potencia de vacío también se puede escribir:

$$P_{cc} = R_{cc} I_{1cc}^2 \quad \text{de donde} \quad R_{cc} = P_{cc}/I_{1cc}^2 = 453/8,6^2 = 6,12 \Omega \quad \text{que coincide con} \quad R_{cc} = Z_{cc} \cos \varphi_{cc} = 6,07 \Omega$$

y la inductancia la podemos determinar:

$$X_{cc} = Z_{cc} \sin \varphi_{cc} = 5,98 \Omega$$

$$Z_{cc} = 6,07 + j5,98 \Omega$$

Los valores de cortocircuito se corresponden con las impedancias de rama del circuito aunque no se conoce cómo se distribuyen exactamente. Se realiza una aproximación suponiendo que las resistencias y reactancias del primario y del secundario equivalente son iguales:

$$R_{cc} = R_1 + R'_2 \quad \text{con} \quad R_1 = R'_2 = R_{cc}/2 = 3,03 \Omega$$

$$X_{cc} = X_1 + X'_2 \quad \text{con} \quad X_1 = X'_2 = X_{cc}/2 = 2,99 \Omega$$

3.- CAÍDA DE TENSIÓN EN UN TRANSFORMADOR, ÍNDICE DE CARGA Y RENDIMIENTO

- La **caída de tensión** (Δu o ε según bibliografías) representa la caída de tensión interna que se da en el transformador al estar en carga. Se suele expresar en función de la tensión nominal o asignada del primario y en %:

$$\varepsilon = (U_{n1} - U'_2)/U_{n1} \quad (\%)$$

- Hay que conocer que el **índice de carga** (C) de una máquina eléctrica es el cociente entre la potencia aparente útil y la potencia aparente nominal o asignada por el fabricante:

$$C = S_2/S_{n2}$$

Este parámetro se relaciona con la caída de tensión mediante la siguiente expresión:

$$\varepsilon = (C R_{cc} I_2 \cos\varphi_2 + C X_{cc} I_2 \sin\varphi_2) / U_{n1} = C \varepsilon_{R_{cc}} \cos\varphi_2 + C \varepsilon_{X_{cc}} \sin\varphi_2$$

donde φ_2 es el ángulo entre U'_2 y I_2 y

$$\varepsilon_{R_{cc}} = R_{cc} I_{n1} / U_{n1} \approx R_{cc} I_2 / U_{n1} \quad (\%)$$

$$\varepsilon_{X_{cc}} = X_{cc} I_{n1} / U_{n1} \approx X_{cc} I_2 / U_{n1} \quad (\%)$$

Ejemplo

Se dispone de un transformador monofásico de 250 kVA, 15.000/250V, 50 Hz que tiene unos parámetros $R_{cc} = 18 \Omega$, $X_{cc} = 31,17 \Omega$. Calcular:

- las caídas de tensión relativas $\varepsilon_{R_{cc}}$ y $\varepsilon_{X_{cc}}$
- la regulación (caída de tensión) a plena carga con factor de potencia 0,8 inductivo
- la tensión secundaria en el caso anterior si la primaria se mantiene constante
- la regulación (caída de tensión) a media carga con factor de potencia 0,6 capacitivo

a) A partir de la potencia podemos calcular la intensidad en el primario:

$$I_{n1} = S_1 / U_{n1} = 250.000 / 15.000 = 16,67 \text{ A}$$

luego

$$\varepsilon_{R_{cc}} = R_{cc} I_{n1} / U_{n1} = (18 * 16,67) / 15.000 = 2\%$$

$$\varepsilon_{X_{cc}} = X_{cc} I_{n1} / U_{n1} = (31,17 * 16,67) / 15.000 = 3,5\%$$

b) A plena carga $C = 1$ y como $\cos\varphi_2 = 0,8$

$$\varepsilon = C \varepsilon_{R_{cc}} \cos\varphi_2 + C \varepsilon_{X_{cc}} \sin\varphi_2 = 1 * 0,02 * 0,8 + 1 * 0,035 * 0,6 = 3,7\%$$

c) Aplicando la expresión:

$$\varepsilon = (U_{n1} - U'_2) / U_{n1} \quad \text{con } \varepsilon = 3,7\%, \quad U_{n1} = 15.000 \text{ V despejando } U'_2 = 14.445 \text{ V}$$

y la tensión en el secundario $U'_2 = r_1 U_2$ luego $U_2 = 240,75 \text{ V}$

d) Para $C = 0,5$ y como $\cos\varphi_2 = 0,6$ (capacitivo **IMPORTANTE SIGNO**)

$$\varepsilon = C \varepsilon_{R_{cc}} \cos\varphi_2 + C \varepsilon_{X_{cc}} \sin\varphi_2 = 0,5 * 0,02 * 0,6 - 0,5 * 0,035 * 0,8 = -0,8\%$$

- El **rendimiento** de un transformador viene determinado por las pérdidas en el mismo. Estas son:
 - Pérdidas en el hierro $P_{Fe} = P_0$
 - Pérdidas en el cobre $P_{cu} = R_{cc} I^2 = C^2 P_{cc}$

El rendimiento se define como el cociente entre la potencia útil que sale del secundario y la potencia útil que entra en el primario:

$$\eta = P_2/P_1 = P_2/(P_2 + P_{\text{pérdidas}}) = P_2/(P_2 + P_{Fe} + P_{cu})$$

Sustituyendo valores obtenemos la expresión final:

$$\eta = (CV_2 I_{n2} \cos \varphi_2) / (CV_2 I_{n2} \cos \varphi_2 + P_0 + C^2 P_{cc})$$

donde $V_2 I_{n2}$ es la potencia nominal o asignada al transformador en kVA.

Existe un índice de carga para el que el rendimiento es máximo y se corresponde a:

$$C_{opt} = \sqrt{(P_0 / P_{cc})}$$

Ejemplo

Se dispone de un transformador monofásico de 250 kVA, 15.000/250V, 50 Hz que tiene unas pérdidas en el hierro de 4.000 W y unas pérdidas en el cobre a plena carga de 5.000 W. Calcular:

- El rendimiento a plena carga con un factor de potencia de 0,8
- El rendimiento a media carga con un factor de potencia unidad
- La potencia de máximo rendimiento
- El rendimiento máximo para un factor de potencia 0,9

a) *Aplicando la expresión*

$$\eta = (CV_2 I_{n2} \cos \varphi_2) / (CV_2 I_{n2} \cos \varphi_2 + P_0 + C^2 P_{cc}) = \\ = (1 * 250000 * 0,8) / (1 * 250000 * 0,8 + 4000 + 1^2 * 5000) = 95,7\%$$

b) *De igual modo $\eta = 96\%$, que es superior al anterior porque aunque ha disminuido la carga ha aumentado el factor de potencia*

c) $C_{opt} = \sqrt{(P_0 / P_{cc})} = \sqrt{(4000 / 5000)} = 0,894$ y la potencia será

$$S_{\eta max} = C_{opt} S_n = 0,894 * 250000 = 223.500 \text{ VA}$$

d) *El rendimiento máximo será para un factor de potencia 0,9*

$$\eta = (CV_2 I_{n2} \cos \varphi_2) / (CV_2 I_{n2} \cos \varphi_2 + P_0 + C^2 P_{cc}) = \\ = (0,894 * 250000 * 0,9) / (0,894 * 250000 * 0,9 + 4000 + 0,894^2 * 5000) = 96,2\%$$

4.- TRANSFORMADORES TRIFÁSICOS

- El análisis de un **transformador trifásico** se realiza por fases, transformando los devanados reales del transformador a conexiones en estrella equivalentes y teniendo en cuenta las reglas de transformación Δ -Y que se vieron en los circuitos trifásicos.

Ejemplo

Un transformador trifásico de 2000 kVA, 6600/33000 V tiene un primario conectado en triángulo y un secundario conectado en estrella. La impedancia de cada fase del primario es $0,5 + j2,6 \Omega$ y la correspondiente del secundario $4,3 + j21,7 \Omega$. Calcular la tensión en bornes del secundario a plena carga con factor de potencia 0,8 cuando el primario se conecta a la tensión asignada de 6600 V.

Transformamos la impedancia del primario a estrella:

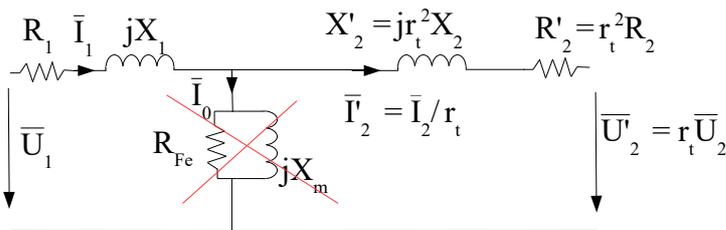
$$Z_{1Y} = Z_{1\Delta}/3 = (0,5 + j2,6)/3 = 0,167 + j0,867 \Omega \text{ siendo la impedancia del secundario } Z_{2Y} = 4,3 + j21,7 \Omega$$

La relación de transformación será:

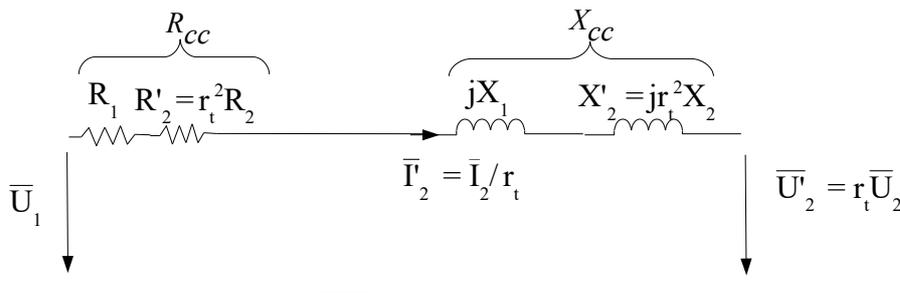
$$r_t = E_{1\text{fase}}/E_{2\text{fase}} = (6600/\sqrt{3})/(33000/\sqrt{3}) = 0,2$$

ya que transformamos el triángulo en estrella y tenemos estrella-estrella

En el funcionamiento en carga, podemos despreciar la rama en paralelo del circuito equivalente reducido al primario



y teniendo en cuenta que $R_{cc} = R_1 + R_2'$ $X_{cc} = X_1 + X_2'$ nos queda el siguiente circuito



La impedancia del circuito es:

$$Z_{cc} = (R_1 + R'_2) + j(X_1 + X'_2) = (R_1 + r_t^2 R_2) + j(X_1 + r_t^2 X_2) = (0,167 + 0,2^2 * 4,3) + j(0,867 + 0,2^2 * 21,7) = 0,339 + j1,735 \Omega$$

Aplicando la Ley 2ª de Kirchhoff al circuito:

$$\bar{U}_1 = \bar{Z}_{cc} \bar{I}'_2 + \bar{U}'_2$$

IMPORTANTE expresión que se puede simplificar de forma no fasorial (calculando únicamente las magnitudes) mediante la siguiente:

$$U_1 - U'_2 = R_{cc} I'_2 \cos\varphi_2 + X_{cc} I'_2 \sin\varphi_2$$

Por tanto:

$$U_2 = 6600/\sqrt{3} - 0,339 * I'_2 * 0,8 - 1,735 * I'_2 * 0,6 \quad (*)$$

determinamos I'_2 a partir de la potencia del transformador:

$$S_n = \sqrt{3} U_{2\text{linea}} I_{2\text{linea}} \quad I_{2\text{linea}} = 2.000.000 / (\sqrt{3} * 33.000) = 35 \text{ A}$$

que como la conexión es en Y será igual a $I_{2\text{fase}}$

$$I'_2 = I_{2\text{fase}} / r_t = 35/0,2 = 175 \text{ A}$$

luego sustituyendo en (*) $U'_2 = 3.580,8 \text{ V}$ y $U_2 = U'_2 / r_t = 17.904,4 \text{ V}$ que es la tensión de salida de la fase que estamos analizando, la tensión de línea de salida será

$$U_{2\text{linea}} = \sqrt{3} * 17.904,4 = 31.011,3 \text{ V}$$

5.- PROBLEMAS RESUELTOS

P1.- Se han realizado los ensayos de vacío y cortocircuito a un transformador de cuya potencia y tensiones nominales son: $S_n = 800 \text{ kVA}$, $U_{1n} = 13,2 \text{ kV}$; $U_{2n} = 400 \text{ V}$. Los resultados que nos ofrecen estos ensayos son los siguientes:

ENSAYO DE VACIO: $I_0 = 1,3\%$ (de I_{1n}); $P_0 = 2.000 \text{ W}$

ENSAYO DE CC: $U_{cc} = 800 \text{ V}$; $P_{cc} = 1.500 \text{ W}$

Determinar mediante cálculo los diferentes parámetros que permitirán construir el circuito eléctrico equivalente. R_{cc} , X_{cc} , R_{Fe} y X_m .

La potencia de vacío viene determinada por:

$$P_0 = U_1 I_0 \cos\varphi$$

Como conocemos que el valor de la intensidad de vacío es un % de la intensidad nominal,

calculamos primero I_{ln} :

$$S_n = U_{ln} I_{ln} \rightarrow 800.000 = 13.200 I_{ln} \rightarrow I_{ln} = 60,60 A$$

$$\text{y por tanto } I_0 = 0,013 * 60,60 = 0,7878 A$$

Despejando de la expresión de la potencia de vacío el factor de potencia, tenemos:

$$2.000 = 13.200 * 0,7878 * \cos\varphi \rightarrow \cos\varphi = 0,1923 \rightarrow \varphi = \arccos(0,1923) = 78,91^\circ$$

Sabemos que I_0 se descompone en:

$$I_0 = I_{Fe} + I_m = I_0 \cos\varphi + I_0 \sin\varphi, \text{ luego}$$

$$I_{Fe} = I_0 \cos\varphi = 0,7878 * 0,1923 = 0,1515 A$$

$$I_u = I_0 \sin\varphi = 0,7878 * \sin(78,91) = 0,773 A$$

Como R_{Fe} y X_m son mucho mayores que R_l y X_l , la potencia absorbida en vacío coincide prácticamente con las pérdidas en el hierro, podemos despreciar estos últimos valores, por tanto:

$$V_l = I_{Fe} R_{Fe} \rightarrow 13.200 = 0,1515 * R_{Fe} \rightarrow \mathbf{R_{Fe} = 87,12 k\Omega}$$

y

$$V_l = I_m X_u \rightarrow 13.200 = 0,773 * X_u \rightarrow \mathbf{X_u = 17,06 k\Omega}$$

Del ensayo de cortocircuito obtenemos el resto de parámetros. Si despreciamos las pérdidas de vacío, la intensidad de cortocircuito coincide con la nominal del primario:

$$I_{cc} = I_{ln} = 60,60 A$$

Con los datos del ensayo obtenemos el factor de potencia para descomponer la tensión:

$$P_{cc} = U_{cc} I_{cc} \cos\varphi$$

$$1.500 = 800 * 60,60 * \cos\varphi \rightarrow \cos\varphi = 0,0309 \rightarrow \varphi = \arccos(0,0309) = 88,22^\circ$$

Descomponiendo la tensión en su parte real e imaginaria obtenemos los valores de la resistencia y la reactancia solicitados:

$$U_r = U_{cc} \cos\varphi = I_{cc} R_{cc} \rightarrow 800 * \cos(88,22) = 60,60 * R_{cc} \rightarrow \mathbf{R_{cc} = 0,408 \Omega}$$

$$U_x = U_{cc} \sin\varphi = I_{cc} X_{cc} \rightarrow 800 * \sin(88,22) = 60,60 * X_{cc} \rightarrow \mathbf{X_{cc} = 13,19 \Omega}$$

P2 .- Disponemos un transformador monofásico cuya potencia nominal es de 125 kVA, 13,2 kV/230V, con unas pérdidas en el hierro de 1,1 kW y en el cobre a plena carga de 1,8 kW. Las resistencias y reactancias que permiten modelar el transformador son las siguientes:

R_{Fe} 158 kOhm, X_m 145 kOhm, R_{cc} 20 Ohm, X_{cc} 82 Ohm.

Calcular numéricamente:

- el rendimiento de esta máquina cuando funciona a plena carga ($C=1$) con un factor de potencia de 0,83.
- el rendimiento máximo que podemos obtener de ella y con qué coeficiente de carga llegaríamos a él.
- el rendimiento que nos ofrece cuando funciona al 75% de su carga nominal con un fdp de 0,75.
- en las condiciones del apartado a) qué potencia debiera tener la carga alimentada para alcanzar el rendimiento máximo si se mantiene fijo el fdp.

a) El rendimiento de la máquina viene dado por la expresión:

$$\eta = P_2 / P_1 \text{ con } P_2 = C U_{2n} I_{2n} \cos\varphi = C S_n \cos\varphi = 1 * 125.000 * 0,83 = 103,75 \text{ kW } (*)$$

$$y P_1 = P_{p\acute{e}rdidas} + P_2 = P_{Fe} + P_{Cu} + P_2$$

luego calculamos las pérdidas en el hierro y en el cobre:

$$P_{Fe} = P_0 = 1,1 \text{ kW}$$

$$P_{Cu} = C^2 P_{CC} = 1^2 * 1,8 = 1,8 \text{ kW}$$

$$\text{luego } P_1 = 106,65 \text{ kW} \rightarrow \eta = 97,28\%$$

b) cuando el rendimiento es máximo las pérdidas fijas (P_{Fe}) son igual a las pérdidas variables (P_{Cu}):

$$P_{Fe} = P_{Cu} \rightarrow P_0 = C_{opt}^2 P_{CC} \text{ luego el coeficiente de carga óptimo será:}$$

$$C_{opt} = \sqrt{(P_0 / P_{CC})} = \sqrt{(1,1 / 1,8)} = 0,782$$

y sustituyendo C_{opt} en (*)

$$P_2 = 81,13 \text{ kW}$$

$$P_1 = P_{Fe} + P_{Cu} + P_2 = 1,1 + 1,1 + 81,13 = 83,33 \text{ kW} \text{ y el rendimiento máximo } \eta_{max} = 97,36\%$$

c) Sustituyendo en (*) los nuevos valores de C y $\cos\varphi$:

$$P_2 = 70,31 \text{ kW}$$

$$P_1 = P_{Fe} + P_{Cu} + P_2 = 1,1 + 0,75^2 * 1,8 + 70,31 = 72,42 \text{ kW} \text{ luego } \eta = 97,08\%$$

d) La potencia para el rendimiento máximo será:

$$S_{\eta_{max}} = C_{opt} S_n = 0,782 * 125.000 = 97,75 \text{ kVA}$$

P3.- Dentro de una factoría que dispone de red de distribución interna de 20 kV se ha construido un pequeño centro de transformación para dar servicio en baja tensión a un nave de producción. El transformador que se ha instalado tiene una potencia nominal de 60 kVA y conexión Yy, con relación 20 kV/400 V. La impedancia de cortocircuito del transformador es $Z'_{cc} = 520 + j700 \text{ Ohm}$. La alimentación se realiza a través de una línea cuya impedancia es $Z_{línea} = 0,05 + j0,08 \text{ Ohm}$. En el interior de la nave hay una serie de demandas como iluminación, sistemas de transporte y distribución de materiales, etc. Se ha modelado la demanda de la carga mediante la siguiente impedancia $Z_{nave} = 1 + 3j \text{ Ohm}$. Se pide realizar el circuito monofásico equivalente y calcular la tensión (valor de línea) a la que se alimenta las cargas de la nave industrial.

De los datos, sabiendo que la conexión es en Y, podemos deducir:

$$r_i = 50$$

$$U_{línea} = 20.000 \text{ V}$$

$$U_{ifase} = 11.547 \text{ (arg}(0)) \text{ V ya que tomamos esta tensión como referencia de fase}$$

Calculamos los equivalentes de las impedancias de las cargas de la línea y la nave para el monofásico equivalente del primario empleando la siguiente expresión:

$$Z' = r_i^2 Z \quad \text{IMPORTANTE}$$

$$Z_{nave} = 1 + 3j \Omega$$

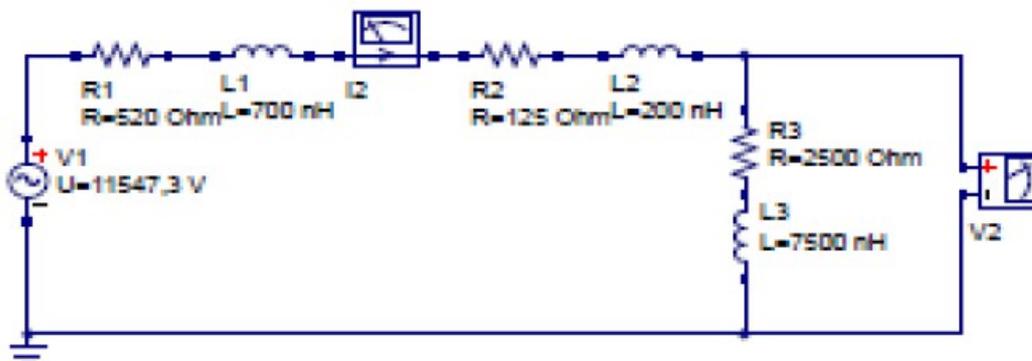
$$Z_{línea} = 0,05 + j0,08 \Omega$$

luego

$$Z'_{nave} = 50^2 * (1 + 3j) = 2500 + 7500j \Omega$$

$$Z'_{línea} = 50^2 * (0,05 + j0,08) = 125 + 200j \Omega$$

y el circuito equivalente será el que se muestra a continuación:



Aplicando la 2ª Ley de Kirchhoff:

$$U_{1fase} = I'_{2fase} (Z'_{cc} + Z'_{nave} + Z'_{linea}) = I'_{2fase} (520 + 700j + 2500 + 7500j + 125 + 200j)$$

$$11.547 = I'_{2fase} (3.145 + 8.400j)$$

$$I'_{2fase} = 11.547(\arg(0)/8.969,45 \arg(69,47^\circ)) = 1,287 \arg(-69,47^\circ) A$$

$$\text{como } I_{2fase} = r_i I'_{2fase} = 50 * 1,287 \arg(-69,47^\circ) = 64,35 \arg(-69,47^\circ) A$$

y la conexión también es en estrella ($I_{linea} = I_{fase}$):

$$I_{2linea} = I_{2fase} = 64,35 \arg(-69,47^\circ) A$$

Calculamos la tensión de línea a partir de las tensiones de fase:

$$V'_{2fase} = I'_{2fase} * Z'_{nave} = 1,287 \arg(-69,47^\circ) * 7.905,69 \arg(71,56^\circ) \\ = 10.174,62 \arg(2,09^\circ) V$$

$$V'_{2fase} = r_i V_{2fase} \rightarrow V_{2fase} = 203,49 \arg(2,09^\circ) V$$

y la tensión de línea a la que se alimentan las cargas de la nave industrial es:

$$V_{2linea} = \sqrt{3} V_{2fase} = 352,45 \arg(2,09^\circ) V$$