SESION 2.3: EVALUACION DE PERDIDAS DE ENERGIA EN TRANSFORMADORES

1. PERDIDAS EN UN TRANSFORMADOR

Pérdidas por efecto joule en el cobre del arrollamiento, se obtienen en el ensayo de corticircuito

$$\Delta W_{CU} = R_1 I_1^2 + R_2 I_2^2 \quad \Xi \; R_{eq1} I_1^2 \; \Xi \; R_{eq2} I_2^2$$

Donde: Req1 = Resistencia equivalente referida al primario.

Req2 = Resistencia equivalente referida al secundaria

Pérdidas en el circuito magnético(pérdidas en el núcleo), se obtienen en el ensayo de circuito abierto o de vacío:

$$\Delta W_{FE} = \ell \, r \, V_0^2$$

La potencia absorbida por el primario es: $\Delta W = \Delta W_{CU} + \Delta W_{FE} =$

2. CONVENCION INTERNACIONAL DE LA EFICIENCIA

La eficiencia varía con las condiciones de la carga del transformador y para poder comparar diferentes transformadores es necesario definir una EFICIENCIA CONVENCIONAL bajo las siguientes condiciones:

a) Las pérdidas en el hierro se calculan a la tensión secundaria nominal bajo carga y se asume que varían con la temperatura. Se obtiene mediante la prueba en vacío.
b) Las pérdidas en el cobre que resulta de la prueba de cortocircuito, deben corregirse para una temperatura de 75° C que es la temperatura promedio de funcionamiento de los transformadores a plena carga. Siendo la temperatura de prueba entre 20 y 25° C y por lo tanto la resistencia de los arrollamientos es inferior a la que alcanzan a 75°C.
Para determinar la resistencia equivalente referida al lado primario a 75°C, se utiliza la siguiente fórmula:

$$Req_{75°C} = Req_{DC\,t°} = (234.5 + 75°)/(234.5+t°) + (Req_{t°} - Req_{DC\,t°})(234.5 + t°)/(234.5+75°)$$

Donde:

$Req_{DC\ t°}$ = Resistencia equivalente medida con una fuente de corriente contínua a temperatura de prueba t° en el ensayo de cortocircuito.

$Req_{t°}$ = Resistencia equivalente obtenida en el ensayo de cortocircuito con corriente alterna, a la misma temperatura t°

t° = Temperatura de la prueba de cortocircuito.

($Req_{t°} - Req_{DC\ t°}$ = La diferencia en corriente alterna y la resistencia en corriente contínua es debida al efecto pelicular (SKIN) que aumenta las pérdidas en corriente alterna.

En la fórmula anterior se concluye que ante el incremento de la temperatura disminuye el efecto pelicular (se puede decir que las pérdidas por corriente Foucault disminuyen), mientras que hace aumentar la resistencia en corriente contínua.

Las pérdidas en el cobre convencionales se determinan así: $\Delta W_{CU} = Req_{75°} I_N^2$

3. INFLUENCIA DEL FACTOR DE POTENCIA EN LA EFICIENCIA

Si el transformador entrega una potencia aparente S_2 a una carga cuyo factor de potencia es $\cos\emptyset_L$; la potencia activa entregada sería $W_2 = S_2 \cos\emptyset_L$ con ello, la eficiencia se obtiene:

$$\eta = S_2 \cos\emptyset_L / (S_2 \cos\emptyset_L + \Delta W_{CU} + \Delta W_{FE})$$

4. INFLUENCIA DEL REGIMEN DE CARGA EN LA EFICIENCIA

Si el transformador trabaja para diferentes regímenes de carga, evidentemente variará su eficiencia, puesto que variará su potencia entregada (W_2), la patencia absorbida de la línea de alimentación (W_1) y las pérdidas ($\Delta W_{CU} + \Delta W_{FE}$). Habrá lógicamente una carga, para lo cual la eficiencia será la máxima, veamos:

Si tenemos un transformador cuya potencia nominal en el secundario es $\mathbf{S_{N2}}$ y cuyas pérdidas a condiciones nominales son $\mathbf{\Delta W_{CU}}$ y $\mathbf{\Delta W_{FE}}$. Si este transformador trabaja a una determinada fracción de su carga, cumple: $\alpha = S_2/S_{N2} \approx I_2/I_{N2} \rightarrow S_2 = \alpha S_{N2} \quad I_2 = \alpha I_{N2}$

Siendo también $S_2 = S_L \quad W_2 = S_2 \cos\emptyset_L = \alpha S_{N2} \cos\emptyset_L$ y $\Delta W = \Delta W'_{CU} + \Delta W_{FE}$

Donde :

ΔW_{FE} = Pérdidas en el núcleo, prácticamente es constante (independientemente del régimen de carga) y no varía con la temperatura, en consecuencia es la misma pérdida encontrada en la prueba de vacío.

$\Delta W'_{CU}$ = Pérdidas en el cobre de los arrollamientos a un régimen determinado de trabajo y disminuyen al disminuir la carga, ya que disminuye la corriente al disminuir la carga. Como estas pérdidas dependen de I^2, serán proporcionales al cuadrado de α; veamos

$$\Delta W'_{CU} = Req_2 \times I^2 2 = Req_2 \times (\alpha I_{N2})^2$$

Donde , Req_2 tiene que estar corregida a la temperatura de 75 °C. $\Delta W'_{CU} = \alpha^2 (\Delta W_{CU})$

Con ello la eficiencia se da por : $\eta = \alpha S_{N2} \cos\emptyset_L / (\alpha S_{N2} \cos\emptyset_L + \alpha^2 \Delta W_{CU} + \Delta W_{FE})$

VALOR DE α CORRESPONDIENTE A LA MAXIMA EFICIENCIA $\alpha^2_M = \Delta W_{FE} / \Delta W_{FE}$

Sabemos que $\Delta W'_{CU} = \alpha^2 (\Delta W_{CU})$ entonces $\Delta W'_{CU} = (\Delta W_{CU}) \alpha^2_M = \Delta W_{FE}$

Es decir, que cuando las pérdidas en el cobre se igualan a las pérdidas en el hierro, se da la máxima eficiencia, por ende se obtiene α_M

EJEMPLO 1

El rendimiento máximo de un transformador de 20 kVA, 1200/120 V es 98 %, para e 50 % de la potencia nominal. Se desea alimentar una carga cuyo factor de potencia es 0.9, para lo cual calcule:

a) Las pérdidas en el hierro y en el cobre del transformador
b) El rendimiento para cargar de 75 % y del 25 % de la potencia nominal, Compare y explique resultados.

SOLUCION

$S_N = 20$ kVA $V_1 = 1200$ V $V_2 = 120$ V $\eta_{MAX} = 90$ % $\cos\emptyset_L = 0.9$

$\alpha_M = 0.5$ (fracción de potencia nominal con que trabaja para el máximo rendimiento)

a) Cálculo de las pérdidas en el hierro.
En la operación de máximo rendimiento cumple = $\mathbf{\Delta W_{CU} = \alpha^2_M\ \Delta W_{CUN} = \Delta W_{FE}}$ *… ec1*
Luego . $\boldsymbol{\eta}_{MAX} = W_2/(W_2 + \Delta W_{CU} + \Delta W_{FE}) = W_2/(W_2 + 2\Delta W_{FE})$ *… ec2*

$W_2 = S_2 \cos\emptyset_L = 10 \times 0.9 = 9\ kW = 9000\ W$

en (2) $0.98 = 9000/(9000 + 2\ \Delta W_{FE})$ $\Delta W_{FE} = 91.84\ W$

Las pérdidas en el cobre del transformador consiste en calcular pérdidas en condiciones a plena carga (nominales):

De la ecuación (1) $\mathbf{\Delta W_{CU} = \alpha^2_M\ \Delta W_{CUN}}$ $\mathbf{\Delta W_{CUN} = \Delta W_{CU} / \alpha^2_M} = 91.84/0.5^2 = 367.36\ W$

ΔW_{CUN} = pérdidas del cobre a plena carga = 367.36 W

b) Cálculo del rendimiento para cargas de 75 % y del 125 % de la potencia nominal.

<u>b.1 Para carga del 75% de la nominal: α = 0.75</u>

Sabemos $\Delta W_{CU} = \alpha^2_M\ \Delta W_{CUN} = 0.75^2\ (367.36) = 206.64\ W$

$W_2 = S_2 \cos\emptyset_L$ $S_2 = \alpha\ S_N$ $W_2 = \alpha\ S_N \cos\emptyset_L = 0.75 \times 2000 \times 0.9 = 13\ 500\ W$

. $\boldsymbol{\eta} = 13500/(13500 + 206.64 + 91.84) = 0.978 = 97.8\%$

<u>b.1 Para carga del 125% de la nominal: α = 1.25</u>

Sabemos $\Delta W_{CU} = \alpha^2_M\ \Delta W_{CUN} = 1.25^2\ (367.36) = 574\ W$

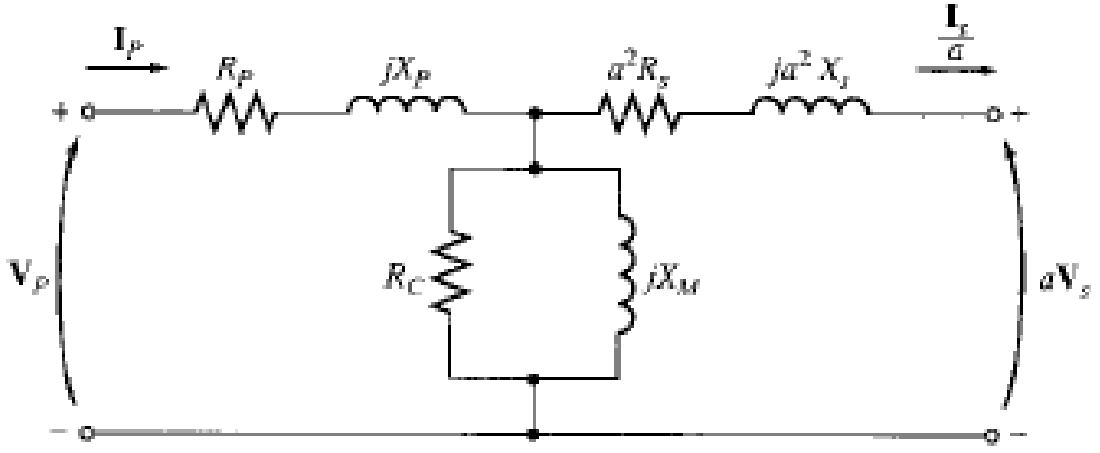
$W_2 = S_2 \cos\emptyset_L$ $S_2 = \alpha\ S_N$ $W_2 = \alpha\ S_N \cos\emptyset_L = 1.25 \times 2000 \times 0.9 = 22\ 500\ W$

. $\boldsymbol{\eta} = 22500/(22500 + 91.84 + 574) = 0.971 = 97.1\%$ $\boldsymbol{\eta_{1.25} < \eta_{0.75}}$

5. DETERMINACION DE PARAMETROS DEL CIRCUITO EQUIVALENTE DE UN TRANSFORMADOR

Para determinar las constantes del circuito equivalente (Zeq=Req + j Xeq) y medir las pérdidas de potencia de un transformador se utilizan métodos de ensayo muy sencillos que consiste en medir la tensión, corriente y potencia de entrada en el primario, estando el secundario en cortocircuito y en circuito abierto o vacío

<u>En la prueba de circuito abierto</u>, se deja abierto el devanado secundario del transformador y el devanado primario se conecta al voltaje pleno nominal. En las condiciones descritas, toda la corriente de entrada debe fluir por la rama de excitación, tal como se puede ver en el siguiente circuito equivalente

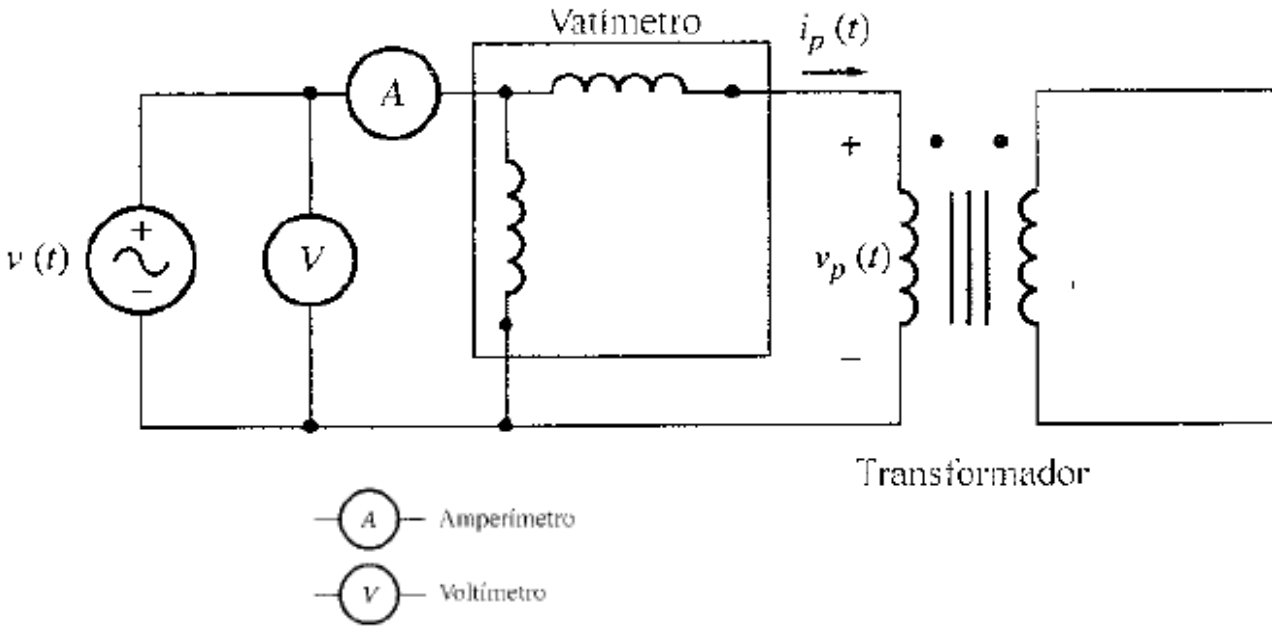


Las componentes en serie R_P y X_P son tan pequeñas, comparadas con **R_C y X_M**, para ocasionar una caída significativa del voltaje que, esencialmente, todo el voltaje de entrada cae a través de la rama de excitación,

La siguiente figura muestra las conexiones para la prueba de circuito abierto. Se aplica voltaje pleno al primario del transformador y se miden el voltaje, la corriente y la potencia de entrada al transformador. Con esta información es posible determinar el factor de potencia, la magnitud y el ángulo de impedancia de excitación.

La forma más fácil para calcular los valores de R_C y X_M consiste en estimar primero la admitancia de la rama de excitación. La conductancia de la resistencia de pérdidas en el núcleo está dada por

$G_C = 1/ R_C$ y la **<u>susceptancia</u>** de la inductancia de magnetización es **$B_M = 1/X_M$**



La magnitud de la admitancia de excitación(referida al circuito primario) puede calcularse a partir de los valores de voltaje y corriente de la prueba de circuito abierto: ***Y_E = Ioc/Voc***

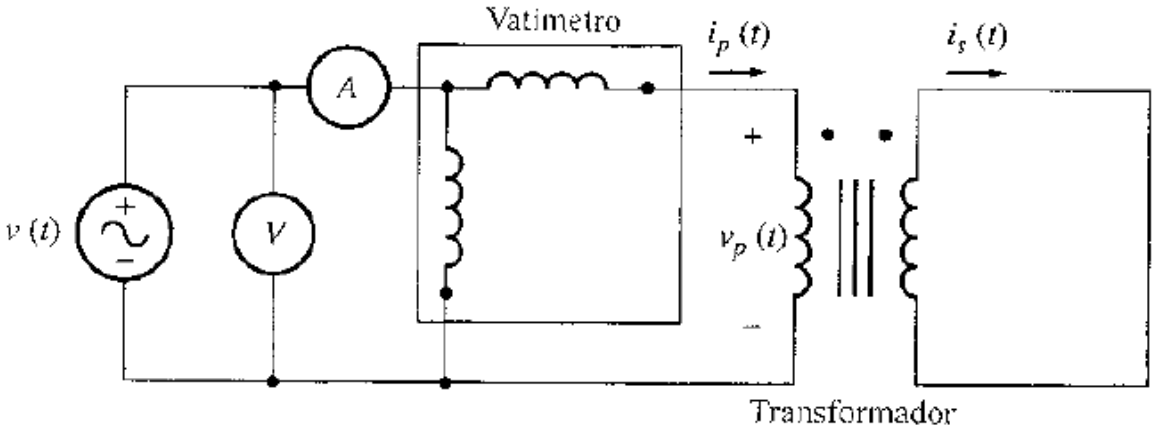
El ángulo de la admitancia puede encontrarse a partir del factor de potencia. El factor de potencia del circuito abierto (PF) está dado por**: FP = *cosθ*= Poc/(*Voc Ioc*).** El ángulo del factor de potencia es ***θ*= $\cos^{-1}$ Poc/(*Voc Ioc*).**

El factor de potencia está siempre en atraso para un transformador real, de modo que el ángulo de la corriente siempre atrasa al voltaje en ***θ*** grados. Por lo tanto la admitancia ***Y_E*** es

Y_E = Ioc/Voc <- θ

Luego es posible determinar los valores de **R_C y X_M**,directamente de los datos de la prueba de circuito abierto.

<u>En la prueba de cortocircuito</u>, los terminales del secundario del transformador se cortocircuitan y los del primario se conectan a una fuente adecuada de voltaje, como se muestra en la siguiente figura:



El voltaje de entrada se ajusta hasta que la corriente de los devanados cortocircuitados sea igual a su valor nominal.

Puesto que el voltaje de entrada es tan pequeño durante la prueba, la corriente que fluye por la rama de excitación es despreciable. Si la corriente de excitación se ignora, toda la caía de voltaje en el transformador puede ser atribuida a los elementos del circuito en serie. La magnitud de las impedancias en serie, referidas al lado primario del transformador es:

Z_{SE} = Vsc/Isc El factor de potencia es **FP = *cosθ*= Psc/(*Vsc Isc*).**

y está en atraso. El ángulo de la corriente es negativo y el ángulo ***θ*** de la impedancia total es positivo. ***θ*= cos^{-1} Psc/(*Vsc Isc*). Enonces Z_E = *Vsc/Isc < θ* Z_E = *Vsc/Isc <cos^{-1}FPθ***

La impedancia en serie: Z_{SE}, es igual a: Z_{SE} = Req + jXeq

EJEMPLO 2

Se requiere determinar las impedancias del circuito equivalente de un transformador de 20 kVA, 8000/240 V, 60 Hz. Las pruebas de circuito abierto y cortocircuito se hicieron en el lado primario del transformador, arrojando los siguientes resultados:

Prueba de circuito abierto (en el primario)	Prueba de cortocircuito(en el primario)
Voc = 8000 V	Vsc = 489 V
Ioc = 0.214 A	Isc = 2.5 A
Poc = 400 W	Psc = 240 W

Encuentre las impedancias del circuito equivalente, referido al lado primario, y dibuje el circuito.

SOLUCION:

El factor de potencia durante la prueba de circuito abierto es: **FP = *cosθ*= Poc/(*Voc Ioc*).**

cosθ= 400W/(8000 V)(0.214 A) = 0.234 en atraso

La admitancia de excitación está dada por : ***Y_E* = *Ioc/Voc <- θ*** = 0.214 A/8000 V<cos-1(0.234)

***Y_E* =** 0.0000268 < -76.5° Ω = 0.0000063 – j 0.0000261 = 1/R_C – j 1/X_M

R_C = 159 kΩ X_M = 38.4 kΩ

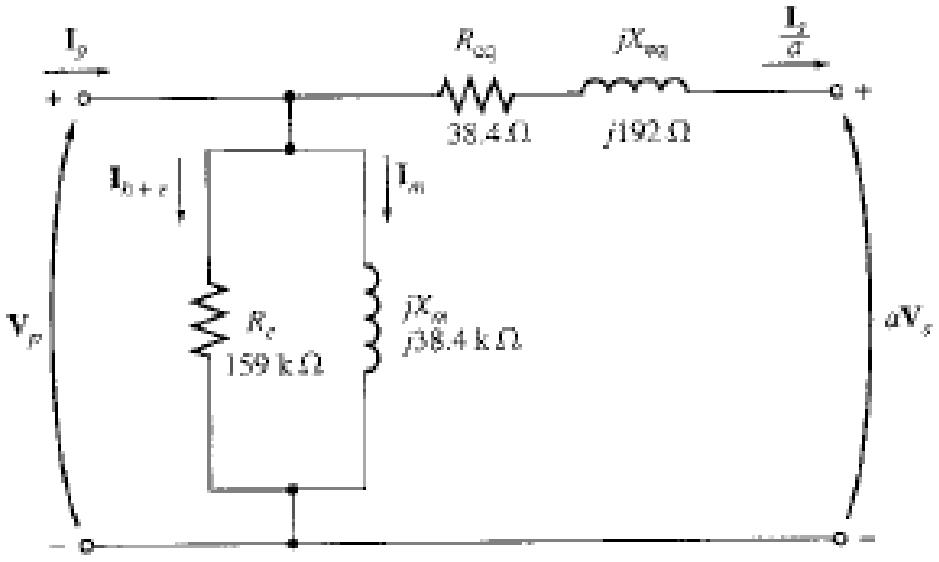
El factor de potencia durante la **<u>prueba de cortocircuito</u>** es **FP = *cosθ*= Psc/(*Vsc Isc*).**

$cos\theta$= 240W/(489 V)(2.5 A) = 0.234 en atraso

La impedancia serie está dada por : $Z_E = Vsc/Isc <cos^{-1}FP\theta = 489V/2.5\ A <78.7°$

$$Z_E = 195.6<78.7° = 38.4 + j\ 192\ \Omega$$

El circuito se muestra a continuación:



6. COMPROBACION

I. Marque verdadero (V) o falso (F)

1. Respecto a la prueba en cortocircuito

a) Se suminsitra una tensión hasta alcanzar el valor de la corriente nominal ( )

b) Los valores se miden en el primario ( )

c) Se está cortocircuitando el secundario ( )

d) A y V es el voltímetro y el amperímetro ( )

e) El valor de V puede ser el valor nominal ( )

f) El valor de A puede ser el valor nominal ( )

g) El factor de potencia es el cociente entre el valor del vatímetro y el producto V.A ( )

h) La impedancia es el cociente entre V y A ( )

i) El valor de la impedancia se mide ( )

j) El valor de la impedancia se calcula ( )

k) La impedancia es la impedancia en cortocircuito ( )

l) El valor de tensión es la tensión de cortocircuito ( )

m) El valor de tensión se puede expresar en V, %, p.u ( )

2. Respecto a la prueba en circuito abierto de un tranaformador

n) Se suminsitra una tensión hasta alcanzar su valor nominal ( )

o) Los valores se miden en el primario ( )

p) Se está cortocircuitando el secundario ( )

q) **A y V es el voltímetro y el amperímetro** ( )

r) El valor de V puede ser el valor nominal ( )

s) El valor de A puede ser el valor nominal ( )

t) El factor de potencia es el cociente entre el valor del vatímetro y el producto V.A ( )

u) La impedancia es el cociente entre V y A ( )

v) El valor de la impedancia se mide ( )

w) El valor de la impedancia se calcula ( )

x) La impedancia es la impedancia del núcleo ( )

y) El valor de tensión es la tensión de cortocircuito ( )

II. RESOLVER

1. La capacidad nominal de un transformador monofásico de dos devanados es de 20 kVA, 480/120V, 60Hz. Durante una prueba de cortocircuito, en donde se aplica la corriente nominal a la frecuencia nominal al devanado de 480 V (denotado como devanado1), con el devanado de 120 V (devanado 2) en cortocircuito, se obtienen las lecturas siguientes: V_{1cc}=35 V, P_{1cc}=300 w. Durante una prueba de circuito abierto, se obtiene las lecturas siguientes: I_{2ca}=12A, P_{2ca}=200w. Determine

   a) La corriente de cortocircuito. (41.67 A)

   b) El factor de potencia en cortocircuito y el ángulo (0.206, 78.11°)

   c) La Impedancia de cortocircuito (0.84 Ohm)

   d) La tensión de cortocircuito en valores por unidad (p.u) (0.0729)

   e) La tensión de cortocircuito en valores por ciento (7.29 %), compruebe si está dentro del estándar.

   f) La Impedancia de cortocircuito en valor porcentual (7.29 %)

   g) A partir de la prueba de cortocircuito, determine la impedancia equivalente en serie Zeq1=Req1+jXeq1, referida al devanado1. Desprecie la admitancia en derivación. (0.1728 + j0.8220) Ohm)

   h) El factor de potencia en circuito abierto y el ánguulo. (0.139, 82.01°)

   i) Calcule el % de corriente de excitación. (7.12%), compruebe si está dentro del estándar.

   j) La Impedancia en derivación (10 Ohm)

   k) La corriente en derivación debida a la conductancia (1.67A)

   l) La corriente en derivación debida a la magnetización (11.88 A).

   m) La Resistencia y la condcutancia del núcleo (71.85 Ohm, 0.01392 Siemen)

   n) La Reactancia y la suceptancia del núcleo (0.099 Ohm, 10.101 Siemen)

ñ) partir de la prueba de circuito abierto, determine la admitancia en derivación Ym=Gc–jBm, referida al devanado1. Desprecie la impedancia en serie. (0.000868-j0.00619).

o) Dibuje el circuito equivalente referido al primario.

p) En un diagrama fasorial, represente el vector de corriente y tensión para ambas pruebas

2. Suponga que tiene un transformador de la misma potencia y relación de transformación, pero obtiene una tensión de cortocircuito del 5.2 %. Cuál seleccionaría y porqué

3. Suponga que tiene un transformador de la misma potencia y relación de transformación, pero obtiene una corriente de excitación del 5 % Cuál seleccionaría y porqué.

4. Determinar la regulación y eficiencia de un transformador de 15 kVA, 2400/240 V 60 Hz, cuando funciona a plena carga con un factor de potencia de 0.8 en atrazo.

Prueba de circuito abierto (en el primario)	Prueba de cortocircuito(en el primario)
Voc = 240 V	Vsc = 74.5 V
Ioc = 1.7 A	Isc = 6.25 A
Poc = 84 W	Psc = 237 W
	60 Hz 25°C

Resistencias de cortocircuito medidas al paso de coriente continua (DC) a 25°C

$R_{DC\ H}$ = 2.80 Ω y $R_{DC\ B}$ = 0.0276 Ω H = Alta tensión B = Baja Tensión

5. Se prueba un transformador de 15 kVA 2300/230 V para determinar sus componentes de la rama de excitación, sus impedancias serie y su regulación de voltaje. Los siguientes datos fueron obtenidos de las pruebas en el lado del transformador:

Prueba de circuito abierto (en el primario)	Prueba de cortocircuito(en el primario)
Voc = 2300 V	Vsc = 47 V
Ioc = 0.21 A	Isc = 6.0 A
Poc = 50 W	Psc = 160 W

a) Encuentre el circuito equivalente del transformador, referido al lado de alto voltaje

b) Encuentre el circuito equivalente del transformador, referido al lado de bajo voltaje

c) Utilizando la ecuación exacta para Vp, calcule la regulación de voltaje a plena carga si los factores de potencia son 0.8 en atraso, 1.0 y 0.8 en adelanto.

d) Haga los mismos cálculos pero utilizando la ecuación aproximada para Vp ¿Qué tan exactos son los valores aproximados a los valores exactos?

e) Dibuje la regulación de voltaje con carga desde vacío hasta plena carga, si los factores de potencia son 0.8 en atraso, 1.0 y 0.8 en adelanto.

f) ¿Cuál es la eficiencia del transformador a plena carga si el factor de potencia es 0.8 en atraso.

III. Marque la(s) alternativas(s) correctas

1. La Potencia Nominal de un Transformador se mide en:
   a) MVA b) MW c) kW d) kVA
2. La temperatura máxima a condiciones nominales de un transformador es:
   a) 22°C b) 20°C c) 75°C d) 100 °C
3. En un transformador hay pérdidas por Histérisis y Facoult, esta se da en:
   a) El núcleo b) Bobinado c) Aceite d) Aislamiento
4. Las pérdidas en el núcleo se puede medir con la corriente:
   a) De excitación b) De la carga c) Del Bobinado d) Alterna
5. La corriente de magnetización de un transformador, respecto a la tensión, está
   a) En fase b) Adelantado 90° c) Retrazado 90° d) Retrazado 180°
6. En la prueba de cortocircuito de un transformador, se determina las pérdidas en
   a) El núcleo b) Bobinado c) Aceite d) Aislamiento
7. En la prueba de circuito abierto de un transformador, se determina las pérdidas en
   a) El núcleo b) Bobinado c) Aceite d) Aislamiento
8. En la prueba de cortocircuito de un transformador, se mide:
   a) La Potencia b) La corriente c) La tensión d) La Resistencia
9. En la prueba de circuito abierto de un transformador, se mide:
   a) La Potencia b) La corriente c) La tensión d) La Resistencia
10. Un transformador trifásico de 380/220 V - 12 kVA, la corriente nominal en el primario es:
    a) 18.25 A b) 31.58 c) 26.27 A d) 52.54 A
11. Un transformador de 380/220 V - 12 kVA, tiene una resistencia de 0.028 Ω en el primario, el valor de esta resistencia en el secundario es:
    a) 0.014 Ω b) 0.048 Ω c) 0.016 Ω d) 0.084 Ω
12. Un transformador de 380/220 V - 12 kVA, tiene una tensión en vacio de 230 V, y a plena carga 375 V, la regulación es:
    a) 63.0 % b) 2.5 % c) 4.34% d) 6.1 %