EXAMEN. 16 DE OCTUBRE DE 2014 **CURS0 2014/2015**

Problema (10 puntos).

A un transformador trifásico Dyn11 de potencia nominal trifásica 400 kVA y tensiones de línea 24.000/400V, 50Hz se le ha realizado un ensayo de vacío y otro de cortocircuito.

Del ensayo de vacío, realizado en el devanado de baja tensión (B.T.), se obtienen los siguientes datos: I_0=2% de la nominal, P_0=1.170W.

Del ensayo de cortocircuito, realizado en el devanado de alta tensión (A.T.), se obtienen los siguientes datos: P_{CC}=5.800W y ε_{cc}=4%.

a) Dibujar el circuito equivalente monofásico aproximado del transformador reducido al primario. Indica el grupo de conexión, el índice horario y expresa este último en grados **(0,5)**

b) Obtener de la corriente de vacío, I_0, si el ensayo de vacío se realizara desde el primario **(1)**

c) Obtener el valor de R_{Fe} referida al primario a partir de los datos del ensayo de vacío. **(1)**

d) Obtener el valor de X_μ referida al primario a partir de los datos del ensayo de vacío. **(0,75)**

e) Obtener las pérdidas en el hierro P_{Fe}. **(0,25)**

f) Obtener el valor de R_{cc} referida al primario a partir de los datos del ensayo de cortocircuito. **(1 punto)**

g) Obtener el valor de X_{cc} referida al primario a partir de los datos del ensayo de cortocircuito. **(0,75 puntos)**

h) Sobre el circuito monofásico equivalente, si estando el transformador en funcionamiento normal (tensiones y corrientes nominales), ocurriese un cortocircuito accidental entre fase y neutro en el secundario. ¿Cuál sería la corriente de cortocircuito en el secundario? **(0,75)**

i) Calcula el índice de carga óptimo. **(0,5 puntos)**

j) Calcula la potencia de máximo rendimiento. **(0,5 puntos)**

k) Sobre el circuito monofásico equivalente, caída de tensión en el transformador cuando suministra potencia de máximo rendimiento con factor de potencia unidad. ¿cuál es el valor de la regulación ε? **(1 puntos)**

l) Sobre el circuito monofásico equivalente, en el secundario de ese transformador (lado B.T.) se ha colocado una carga puramente resistiva de 4Ω, conectada a través de un conductor de impedancia 0,1+j0,2Ω. Calcular la caída de tensión en el transformador cuando alimenta a dicha carga. **(1 punto)**

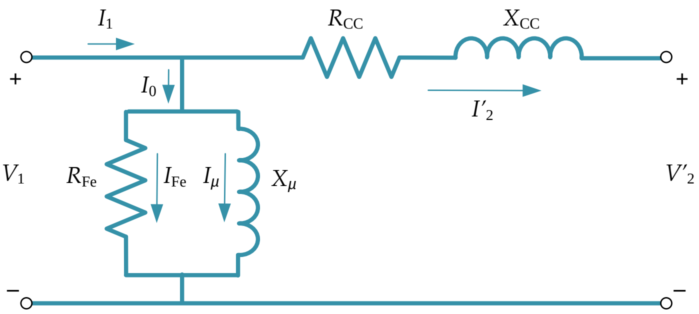
m) Si se desea ampliar la potencia de la instalación hasta los 600kVA, indica, ayudándote de la tabla adjunta, cómo modificarías la instalación. **(1 punto)**

CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS DE TRANSFORMADORES TRIFÁSICOS SERIE 24kV
(SEGÚN NORMAS UNE 20.101 y CEI 76)

Potencia kVA	50	75	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1000
Grupo de conexión	Yyn 0	Yyn 0	Yyn 0	Dyn 11	Dyn 11	Dyn 11	Dyn 11	Dyn 11	Dyn 11	Dyn 11	Dyn 11	Dyn 11	Dyn 11
P_0 (kW)	0,24	0,33	0,40	0,48	0,58	0,69	0,82	0,98	1,17	1,38	1,64	1,96	2,15
P_{cc} (kW)	1,39	1,87	2,20	2,53	2,97	3,49	4,10	4,86	5,80	6,89	8,22	10,24	13,3
ε_{cc} (%)	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	6	6
I_0 en % I_{1n}	4,7	4,1	3,3	3	2,7	2,4	2,2	2,1	2	2	1,9	1,8	1,6
Long. (m)	0.8	0,9	0,9	1,0	1,2	1,3	1,4	1,4	1,5	1,5	1,7	1,9	2,0
Anch. (m)	0,7	0,7	0,8	0,8	0,8	0,8	0,9	0,9	1,0	1,0	1,2	1,3	1,3
Altura (m)	1,2	1,3	1,4	1,4	1,4	1,5	1,5	1,5	1,5	1,6	1,7	1,7	1,9
Peso (kg)	385	481	570	655	731	834	976	1100	1422	1640	1930	2267	2645

a) Dibujar el circuito equivalente monofásico aproximado del transformador reducido al primario. Indica el grupo de conexión, el índice horario y expresa este último en grados **(0,5 ptos.)**

Se trabajará con el monofásico equivalente, por lo tanto el circuito equivalente aproximado reducido al primario es:



El grupo de conexión es Dyn, es decir, triángulo en el lado de A.T. y estrella en el de B.T., con el neutro accesible.
El índice horario es 11, que expresado en grados es 11·30º = 330º.

b) Obtener de la corriente de vacío, I_0, si el ensayo de vacío se realizara desde el primario **(0,75 ptos.)**

Método 1.- Directamente, como porcentaje de la corriente nominal. La corriente nominal de línea del primario es:

$$S_N = \sqrt{3} \cdot V_{1n} \cdot I_{1n} = \sqrt{3} \cdot 24.000 V \cdot I_{1n} = 400 kVA;\ I_{1n} \approx 9{,}62 A$$

La corriente de vacío de línea desde el primario es el 2%:

$$I_0 = I_{01L} = \frac{2\% \cdot I_{1n}}{100} = \frac{0{,}02 \cdot 9{,}62}{100} A \approx 0{,}192 A$$

Método 2.- A través de las relaciones de transformación, a partir de la corriente del secundario. La relación de transformación dada por el cociente del número de espiras, se hace entre devanados, independientemente de su configuración en *Y* o en *D (Δ)*. En este caso el primario está en *D (Δ)* y el secundario en *Y*.

$$\frac{U_{1\Delta}}{U_{2Y}} = \frac{U_{1L}}{U_{2FN}} = \frac{N_1}{N_2};$$

La relación de transformación en función de las tensiones de línea resulta:

$$\frac{U_{1L}}{\frac{U_{2L}}{\sqrt{3}}} = \frac{N_1}{N_2}$$

Para las corrientes se cumple:

$$N_1 \cdot I_{1F} = N_2 \cdot I_{2L};$$

que puesto en función de las corrientes de línea, verifica:

$$N_2 \cdot I_{2L} = N_1 \cdot \frac{I_{1L}}{\sqrt{3}};\ \frac{I_{2L}}{\frac{I_{1L}}{\sqrt{3}}} = \frac{N_1}{N_2}$$

e igualando número de espiras en función de las corrientes y las tensiones:

$$\frac{I_{2L}}{\frac{I_{1L}}{\sqrt{3}}} = \frac{N_1}{N_2} = \frac{U_{1L}}{\frac{U_{2L}}{\sqrt{3}}}; \quad \boxed{I_{1L} = I_{2L}\frac{U_{2L}}{U_{1L}}}$$

La relación de transformación de corriente de línea coincide con la inversa de la relación de transformación de tensiones de línea.

$$I_{01L} = I_{02L}\frac{U_{2L}}{U_{1L}}$$

La corriente nominal de línea del secundario es:

$$S_N = \sqrt{3}\cdot V_{2n}\cdot I_{2n} = \sqrt{3}\cdot 400V\cdot I_{2n} = 400kVA;\ I_{2n} = \frac{1000}{\sqrt{3}}A \approx 577{,}35A$$

La corriente de vacío de línea desde el secundario es:

$$I_0 = I_{02L} = \frac{2\%\cdot I_{2n}}{100} = \frac{20}{\sqrt{3}}A \approx 0{,}02\cdot 577{,}35A = 11{,}54A$$

La corriente de vacío de línea desde el primario es:

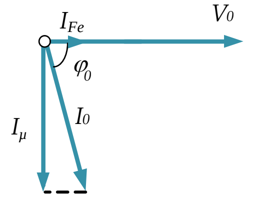
$$\boxed{I_{01L} = I_{02L}\frac{U_{2L}}{U_{1L}} = \frac{20}{60\cdot\sqrt{3}}A = \frac{1}{3\cdot\sqrt{3}}A \approx 11{,}54A\frac{400V}{24.000V} \approx 0{,}192A}$$

La corriente de vacío de fase desde el primario, por su configuración en *D* es:

$$\boxed{I_{01F} = \frac{I_{01L}}{\sqrt{3}} = \frac{1}{3\cdot\sqrt{3}\cdot\sqrt{3}}A = \frac{1}{9}A \approx \frac{0{,}192A}{\sqrt{3}} = 0{,}1108A}$$

c) *Obtener el valor de R_{Fe} referida al primario partir de los datos del ensayo de vacío.* **(1 punto)**

Método 1.- El consumo en vacío está relacionado con la pérdidas en el hierro lo que permite obtener la rama paralelo del equivalente monofásico aproximado del transformador.



A partir del ensayo se obtiene:

$$P_0 = \sqrt{3}\cdot V_{2n}\cdot I_{02}\cdot\cos\varphi_0;\quad \cos\varphi_0 = \frac{P_0}{\sqrt{3}\cdot V_{2n}\cdot I_{02}} = \frac{1.170W}{\sqrt{3}\cdot 400V\cdot 11{,}54A} = 0{,}146;\ \varphi_0 = 81{,}59^{\circ}$$

La corriente en el monofásico equivalente es igual a la de línea:

$$I_{Fe2} = I_{02}\cdot\cos\varphi_0 = 11{,}54A\cdot 0{,}146 = 1{,}68A$$

La R_{Fe} se obtiene a partir de la tensión de fase equivalente en el secundario:

$$R_{Fe2} = \frac{V_{2nF}}{I_{Fe2}} = \frac{\frac{400V}{\sqrt{3}}}{1{,}68A} = 137{,}464\Omega$$

Para pasarlo al primario hay que tener en cuenta la relación de transformación en el devanado de cada fase. El primario está en triángulo, por lo que para sacar su monofásico equivalente, habría que convertirlo a la estrella equivalente, resultando que la relación entre la estrella equivalente del primario y la estrella del secundario es:

$$\frac{U_{1Y}}{U_{2Y}} = \frac{\frac{U_{1L}}{\sqrt{3}}}{\frac{U_{2L}}{\sqrt{3}}} = \frac{U_{1L}}{U_{2L}} = \frac{24.000V}{400V} = r_t = 60$$

Por tanto la R_{Fe} referida al primario resulta:

$$R_{Fe1} = R_{Fe2} \cdot r_t^2 = 137{,}46\Omega \cdot 60^2 \approx 492.307{,}7\Omega$$

Método 2.- A partir del ensayo, sabiendo que P_0 es independiente del lado del que se realice el ensayo, se puede obtener referida directamente la primario:

$$P_0 = \sqrt{3} \cdot V_{1n} \cdot I_{01} \cdot \cos\varphi_0 ; \quad \cos\varphi_0 = \frac{P_0}{\sqrt{3} \cdot V_{1n} \cdot I_{01}} = \frac{1.170W}{\sqrt{3} \cdot 24.000V \cdot 0{,}192A} = 0{,}146 ; \ \varphi_0 = 81{,}59^{\circ}$$

La corriente en el monofásico equivalente es igual a la de línea:

$$I_{Fe1} = I_{01} \cdot \cos\varphi_0 = 0{,}192A \cdot 0{,}146 = 28{,}14mA$$

La R_{Fe} se obtiene a partir de la tensión de fase equivalente en el primario:

$$R_{Fe} = \frac{V_{01F}}{I_{Fe}} = \frac{\frac{24.000V}{\sqrt{3}}}{28mA} \approx 492.307{,}7\Omega$$

También se puede obtener sabiendo que en el primario conectado en *D*, la corriente que circula es igual a la de línea divida por √3:

$$I_{Fe\Delta} = \frac{I_{01}}{\sqrt{3}} \cdot \cos\varphi_0 = \frac{0{,}192A}{\sqrt{3}} \cdot 0{,}146 = 16{,}18mA$$

La R_{Fe} del triángulo se obtiene a partir de la tensión de línea en el primario:

$$R_{Fe\Delta} = \frac{V_{01}}{I_{Fe}} = \frac{24.000V}{16{,}18mA} \approx 1.476.923{,}07\Omega$$

y la R_{Fe} de la estrella equivalente, que es la del circuito monofásico equivalente, resulta:

$$R_{FeY} = \frac{R_{Fe\Delta}}{3} = \frac{1.483.312{,}73\Omega}{3} \approx 492.307{,}7\Omega$$

Método 3.- A partir de las potencias desde el secundario:

$$P_0 = 3 \cdot \frac{V_F^{\ 2}}{R_{Fe2}} = 3 \cdot \frac{\left(\frac{V_L}{\sqrt{3}}\right)^2}{R_{Fe2}} = 3 \cdot \frac{\left(\frac{400}{\sqrt{3}}\right)^2}{R_{Fe2}} = 1.170W ;$$

$$R_{Fe2} = \frac{V_L^2}{P_0} = \frac{400^2 V^2}{1.170W} \approx 137{,}46\Omega$$

A partir de las potencias desde el primario

$$P_0 = 3\cdot\frac{V_F^{\;2}}{R_{Fe1}} = 3\cdot\frac{\left(\frac{V_L}{\sqrt{3}}\right)^2}{R_{Fe1}} = 3\cdot\frac{\left(\frac{24.000}{\sqrt{3}}\right)^2}{R_{Fe1}} = 1.170W\ ;$$

$$R_{Fe1} = \frac{V_L^2}{P_0} = \frac{24.000^2 V^2}{1.170W} \approx 492.307{,}7\Omega$$

d) *Obtener el valor de X_μ referida al primario a partir de los datos del ensayo de vacío.* **(0,5 puntos)**

Método 1.- Al igual que en el caso anterior, el consumo en vacío está relacionado con la pérdidas en el hierro lo que permite obtener la rama paralelo del monofásico equivalente aproximado del transformador.

La corriente en el monofásico equivalente es igual a la de línea:

$$I_{\mu 2} = I_{02}\cdot sen\varphi_0 = 11{,}54A\cdot sen(81{,}59^o) = 11{,}41A$$

La X_μ se obtiene a partir de la tensión de fase equivalente en el secundario:

$$X_{\mu 2} = \frac{V_{2nF}}{I_{\mu 2}} = \frac{\frac{400V}{\sqrt{3}}}{11{,}41A} \approx 20{,}24\Omega$$

Al igual que en el apartado anterior, para pasarlo al primario hay que tener en cuenta la relación de transformación en el devanado de cada fase. El primario está en triángulo, por lo que para sacar su monofásico equivalente, habría que convertirlo a la estrella equivalente, resultando que la relación entre la estrella equivalente del primario y la estrella del secundario es:

$$\frac{U_{1Y}}{U_{2Y}} = \frac{\frac{U_{1L}}{\sqrt{3}}}{\frac{U_{2L}}{\sqrt{3}}} = \frac{U_{1L}}{U_{2L}} = \frac{24.000V}{400V} = r_t = 60$$

Por tanto la X_μ referida al primario resulta:

$$X_{\mu 1} = X_{\mu 2}\cdot r_t^{\;2} = 20{,}24\Omega\cdot 60^2 \approx 72.864{,}53\Omega$$

Método 2.- Al igual que en el caso anterior, sabiendo que P_0 es independiente del lado del que se realice el ensayo, se puede obtener referida directamente la primario:

$$I_{\mu 1} = I_{01}\cdot sen\varphi_0 = 0{,}192A\cdot sen(81{,}59^o) = 0{,}190A$$

La X_μ se obtiene a partir de la tensión de fase equivalente en el primario:

$$X_{\mu 1} = \frac{V_{01F}}{I_{\mu 1}} = \frac{\frac{24.000V}{\sqrt{3}}}{0{,}190A} \approx 72.864{,}53\Omega$$

También se puede obtener sabiendo que en el primario conectado en *D*, la corriente que circula es igual a la de línea divida por √3:

$$I_{\mu\Delta} = \frac{I_{01}}{\sqrt{3}}\cdot sen\varphi_0 = \frac{0{,}192A}{\sqrt{3}}\cdot 0{,}989 = 109{,}65mA$$

La X_μ del triángulo se obtiene a partir de la tensión de línea en el primario:

$$X_{\mu\Delta} = \frac{V_{01}}{I_{\mu\Delta}} = \frac{24.000V}{109{,}65mA} = 218.859{,}79\Omega$$

y la X_μ de la estrella equivalente, que es la del circuito monofásico equivalente, resulta:

$$X_{\mu Y} = \frac{X_{\mu\Delta}}{3} = \frac{218.859{,}79\Omega}{3} \approx 72.864{,}53\Omega$$

Método 3.- A partir de las potencias desde el secundario:

$$Q_\mu = P_0 \cdot tan\varphi_0 = 1.170W \cdot tan(81{,}59^o) = 1.170W \cdot 6{,}76 = 7.913{,}66VAr$$

$$Q_\mu = 3 \cdot \frac{\left(\frac{V_L}{\sqrt{3}}\right)^2}{X_{\mu 2}} = 3 \cdot \frac{\left(\frac{400}{\sqrt{3}}\right)^2}{X_{\mu 2}} = 7.913{,}66VAr\ ;$$

$$X_{\mu 2} = \frac{V_L^2}{Q_\mu} = \frac{400^2 V^2}{7.913{,}66VAr} \approx 20{,}24\Omega$$

A partir de las potencias desde el primario:

$$Q_\mu = P_0 \cdot tan\varphi_0 = 1.170W \cdot tan(81{,}59^o) = 1.170W \cdot 6{,}76 = 7.913{,}66VAr$$

$$Q_\mu = 3 \cdot \frac{\left(\frac{V_L}{\sqrt{3}}\right)^2}{X_{\mu 1}} = 3 \cdot \frac{\left(\frac{24.000}{\sqrt{3}}\right)^2}{X_{\mu 1}} = 7.913{,}66VAr\ ;$$

$$X_{\mu 1} = \frac{V_L^2}{Q_\mu} = \frac{24.000V^2}{7.913{,}66VAr} \approx 72.864{,}53\Omega$$

e) *Obtener las pérdidas en el hierro P_{Fe}*. **(0,25 puntos)**

El consumo en vacío está relacionado con la pérdidas en el hierro y se puede asumir que las pérdidas de vacío son las pérdidas en el hierro.

$$P_{Fe} = P_0 = 1.170W$$

f) *Obtener el valor de R_{cc} referida al primario a partir de los datos del ensayo de cortocircuito.* **(1 punto)**

Las pérdidas del ensayo de cortocircuito están relacionadas con la pérdidas en los devanados (cobre) lo que permite obtener la rama serie del monofásico equivalente aproximado del transformador.

La potencia de vacío P_{cc} es la misma, ya sea reducida la primario o al secundario:

$$P_{cc} = P_{1cc} = P_{2cc} = 5.800W$$

La corriente nominal del primario es:

$$S_N = \sqrt{3} \cdot V_{1n} \cdot I_{1n} = \sqrt{3} \cdot 24.000V \cdot I_{1n} = 400kVA;\ I_{1n} = 9{,}62A$$

La tensión del ensayo de cortocircuito desde el primario es:

$$\varepsilon_{cc} = \frac{V_{1cc}}{V_{1n}} \cdot 100\ ;$$

$$V_{1cc} = \frac{\varepsilon_{cc} \cdot V_{1n}}{100} = \frac{4 \cdot 24.000V}{100} = 960V$$

$$P_{cc} = \sqrt{3} \cdot V_{1cc} \cdot I_{1n} \cdot \cos\varphi_{cc} \qquad \cos\varphi_{cc} = \frac{P_{cc}}{\sqrt{3} \cdot V_{1cc} \cdot I_{1n}} = \frac{5.800W}{\sqrt{3} \cdot 960V \cdot 9,62A} = 0,362 \quad \varphi_{cc} = 68,74^{o}$$

Método 1.- A partir de las tensiones del monofásico equivalente y con los datos de tensión de cortocircuito del enunciado:

$$V_{Rcc} = \frac{V_{1cc}}{\sqrt{3}} \cdot \cos\varphi_{cc} = \frac{960V}{\sqrt{3}} \cdot 0,362 = 200,64V$$

$$R_{cc} = \frac{V_{Rcc}}{I_{1n}} = \frac{200,64V}{9,62A} = 20,85\Omega$$

Método 2.- A partir de la impedancia de cortocircuito y con la corriente de ensayo de cortocircuito:

$$Z_{cc} = \frac{V_{1ccF}}{I_{1cc}} = \frac{\frac{960V}{\sqrt{3}}}{9,62A} = 57,61\Omega$$

$$R_{cc} = Z_{cc} \cdot \cos\varphi_{cc} = 57,61 \cdot 0,362 = 20,85\Omega$$

Método 3.- A partir de la potencia de cortocircuito:

$$P_{cc} = 3 \cdot I_{cc}^{2} R_{cc} \, ; \quad R_{cc} = \frac{P_{cc}}{3 \cdot I_{cc}^{2}} = \frac{5.800W}{3 \cdot 9,62^{2}A^{2}} = 20,85\Omega$$

g) *Obtener el valor de X_{cc} referida al primario a partir de los datos del ensayo de cortocircuito.* **(0,5 puntos)**

Método 1.- A partir de las tensiones del monofásico equivalente y con los datos de tensión de cortocircuito del enunciado:

$$\varphi_{cc} = 68,74^{o} \, ; \quad sen\varphi_{cc} = 0,931$$

$$V_{Xcc} = \frac{V_{1cc}}{\sqrt{3}} \cdot sen\varphi_{cc} = \frac{960V}{\sqrt{3}} \cdot 0,931 = 516,53V$$

$$X_{cc} = \frac{V_{Xcc}}{I_{1cc}} = \frac{516,53V}{9,62A} = 53,69\Omega$$

Método 2.- A partir de la impedancia de cortocircuito calculada anteriormente:

$$X_{cc} = Z_{cc} \cdot sen\varphi_{cc} = 57,61\Omega \cdot 0,931 \approx 53,69\Omega$$

que equivale a:

$$R_{cc} = Z_{cc} \cdot \cos\varphi_{cc} \, ; \; Z_{cc} = \frac{R_{cc}}{\cos\varphi_{cc}}$$

$$X_{cc} = R_{cc} \cdot \frac{sen\varphi_{cc}}{\cos\varphi_{cc}} = R_{cc} \cdot tag\,\varphi_{cc} = 20,85\Omega \cdot 2,57 \approx 53,69\Omega$$

Método 3.- A partir de la potencia de cortocircuito:

$$Q_{CC} = P_{CC} \cdot tan\,\varphi_{CC} = 5.800W \cdot tan(68,74^{o}) = 5.800W \cdot 2,57 = 14.906,97VAr$$

$$X_{cc} = \frac{Q_{cc}}{3 \cdot I_{cc}^{2}} = \frac{14.906,97W}{3 \cdot 9,62^{2}A^{2}} \approx 53,69\Omega$$

h) *Si estando el transformador en funcionamiento normal (tensiones y corrientes nominales), ocurriese un cortocircuito accidental fase-neutro en el secundario. ¿Cuál sería la corriente de cortocircuito en el secundario?* **(0,75 puntos)**

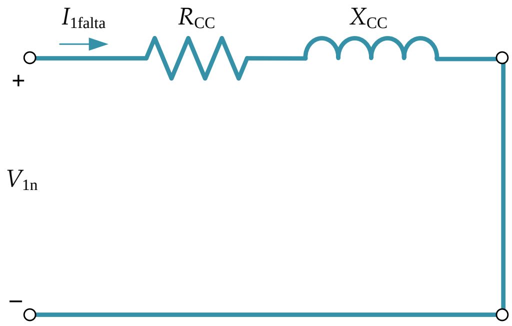
Método 1.- La relación entre corriente nominal y corriente de falta de cortocircuito depende de ε_{cc}:

$$I_{2\,falta} = \frac{I_{2n}}{\varepsilon_{cc}} \cdot 100 = \frac{577{,}35A}{4\%} \cdot 100 = 14.433{,}75A$$

Que vista desde el primario resulta:

$$I_{1\,falta} = \frac{I_{1n}}{\varepsilon_{cc}} \cdot 100 = \frac{9{,}62A}{4\%} \cdot 100 = 240{,}5A$$

Método 2.- El circuito resultante es el equivalente monofásico aproximado del transformador, cortocircuitando su salida y simplificando despreciando la rama paralelo, dado el alto valor de su impedancia respecto de la rama serie. Aplicando Kirchoff a la malla resultante, queda:



$$\mathcal{V}_{1n} = \mathcal{I}_{1falta} \cdot \mathcal{Z}_{cc} = \mathcal{I}'_{2\,falta} \cdot \mathcal{Z}_{cc}$$

$$\mathcal{I}'_{2\,falta} = \frac{\mathcal{V}_{1n}}{\mathcal{Z}_{cc}} = \frac{\dfrac{24.000V}{\sqrt{3}}}{(20{,}85 + j53{,}69\Omega)}\ ;\quad \mathcal{I}'_{2\,falta} = \frac{13.856V}{57{,}59\angle 68{,}77^{o}\,\Omega} = 240{,}5\angle -68{,}77^{o}\,A$$

Es una corriente fase neutro, y como el secundario está en estrella, la corriente de línea y fase coinciden. Por tanto, la corriente real por el secundario será esta misma afectada por la relación de transformación:

$$\mathcal{I}_{2falta} = \mathcal{I}'_{2\,falta} \cdot r_t = 240{,}5\angle -68{,}77^{o}\,A \cdot 60 = 14.443{,}75\angle -68{,}77^{o}\,A$$

i) Calcula el índice de carga óptimo. **(0,75 ptos.)**

Aplicando directamente la expresión, se obtiene:

$$C_{\eta\max} = \sqrt{\frac{P_0}{P_{cc}}} = \sqrt{\frac{1.170W}{5.800W}} \approx 0{,}45$$

j) Calcula la potencia de máximo rendimiento. **(0,75 ptos.)**

Aunque el enunciado no lo pide, el η_{max} se obtiene aplicando directamente la expresión siguiente, para el índice carga óptimo y el $\cos\varphi$ óptimo:

$$\eta_{\max} = \frac{C_{\eta\max} \cdot S_N \cos\varphi}{C_{\eta\max} \cdot S_N \cos\varphi + P_{Fe} + C_{\eta\max}^2 P_{cc}}$$

$$\eta_{\max} = \frac{0{,}45 \cdot 400kVA \cdot 1}{0{,}45 \cdot 400kVA \cdot 1 + 1.170W + 0{,}45^2 \cdot 5.800W} = 0{,}987$$

$$S_{\eta\max} = C_{\eta\max} \cdot S_N = 0{,}45 \cdot 400kVA = 180kVA$$

k) *Sobre el circuito monofásico equivalente, caída de tensión en el transformador cuando suministra potencia de máximo rendimiento con factor de potencia unidad. ¿cuál es el valor de la regulación ε?* **(1 punto)**

Directamente sabemos que la regulación se puede poner de manera aproximada como:

$$\varepsilon_C = C \cdot \varepsilon_{Rcc} \cdot \cos(\varphi_C) + C \cdot \varepsilon_{Xcc} \cdot \mathrm{sen}(\varphi_C)$$

siendo:

$$\varepsilon_{Rcc} = \frac{R_{cc} \cdot I_{1n}}{V_{1n}} \cdot 100 = \frac{V_{Rcc}}{V_{1n}} \cdot 100 \frac{200{,}64V}{\frac{24.000}{\sqrt{3}}V} \cdot 100 = 1{,}44\%;$$

$$\varepsilon_{Xcc} = \frac{X_{cc} \cdot I_{1n}}{V_{1n}} \cdot 100 = \frac{V_{Xcc}}{V_{1n}} \cdot 100 \frac{516{,}53V}{\frac{24.000}{\sqrt{3}}V} \cdot 100 = 3{,}72\%;$$

En este caso el índice de carga es el máximo rendimiento C_{max}=0,45 y como el f.d.p=1, φ_c =0º, resultando la regulación:

$$\boxed{\varepsilon_C = 0{,}45 \cdot 1{,}44\% \cdot 1 + 0{,}45 \cdot 3{,}72\% \cdot 0 = 0{,}64\%}$$

Y como por otro lado:

$$\varepsilon_c = \frac{V_{1n} - V'_2}{V_{1n}} \cdot 100\%$$

La caída de tensión resulta:

$$\varepsilon_c = \frac{V_{1n} - V'_2}{V_{1n}} \cdot 100\% = \frac{\Delta V}{V_{1n}} \cdot 100\%$$

$$\boxed{\Delta V = \frac{\varepsilon_c \cdot V_{1n}}{100\%} = \frac{0{,}64\% \cdot \frac{24.000V}{\sqrt{3}}}{100\%} = 89{,}61V}$$

También podría obtenerse la tensión de fase en el secundario en estas condiciones:

$$\varepsilon_c = \frac{V_{1n} - V'_2}{V_{1n}} \cdot 100\% = \frac{\frac{24.000V}{\sqrt{3}} - V'_2}{\frac{24.000V}{\sqrt{3}}} \cdot 100\% = 0{,}64\%$$

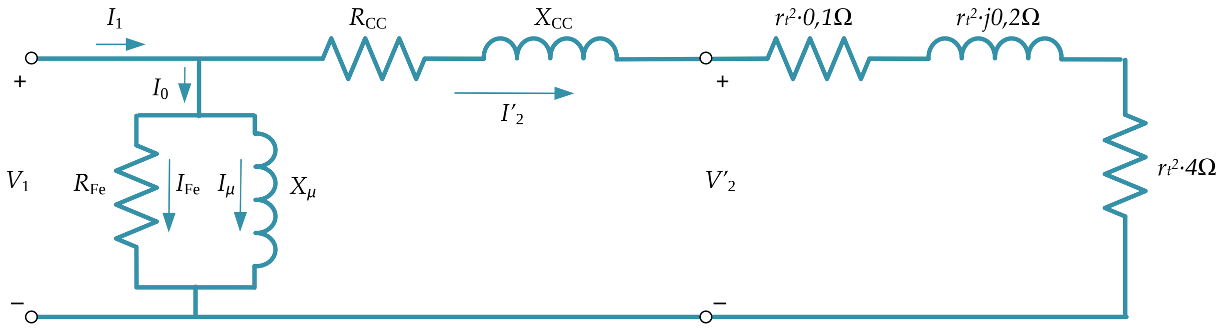
$$V'_2 = 13.766V; \quad V_{2F} = \frac{V'_2}{r_t} = \frac{13.766V}{60} = 229{,}44V$$

Y la de línea:

$$V_{2L} = V_{2F} \cdot \sqrt{3} = 229{,}44V \cdot \sqrt{3} = 397{,}41V$$

l) *Sobre el circuito monofásico equivalente, en el secundario de ese transformador (lado B.T.) se ha colocado una carga puramente resistiva de 4Ω, conectada a través de un conductor de impedancia 0,1+j0,2Ω. Calcular la caída de tensión en el transformador cuando alimenta a dicha carga.* **(1 punto)**

El circuito resultante es el equivalente aproximado del transformador, con la impedancia de la línea y una carga *R*. Se puede simplificar despreciando la rama paralelo, dado el alto valor de su impedancia respecto de la rama serie. Lo primero es reducir las cargas del secundario a su equivalente en el primario.



$$\mathcal{Z}_L^{'} = \mathcal{Z}_L \cdot r_t^2 = (0{,}1 + j0{,}2)\Omega \cdot 60^2 = (360 + j720)\Omega$$

$$\mathcal{Z}_R^{'} = \mathcal{Z}_R \cdot r_t^2 = 4\Omega \cdot 60^2 = 14.400\Omega$$

Aplicando Kirchoff a la malla resultante, queda:

$$\mathcal{V}_1 = \mathcal{I}_2^{'} \cdot (\mathcal{Z}_{cc} + \mathcal{Z}_L + \mathcal{Z}_c)$$

$$\mathcal{I}_2^{'} = \frac{\mathcal{V}_1}{\mathcal{Z}_{cc} + \mathcal{Z}_L + \mathcal{Z}_C} = \frac{\frac{24.000V}{\sqrt{3}}\angle 0^\circ}{(20{,}85 + j53{,}69\Omega) + (360 + j720\Omega) + 14.400\Omega} = \frac{\frac{24.000V}{\sqrt{3}}\angle 0^\circ}{(14.780{,}85 + j773{,}69)\Omega}$$

$$\mathcal{I}_2^{'} = \frac{\frac{24.000V}{\sqrt{3}}\angle 0^\circ}{14.801{,}08\angle 3^\circ\Omega} = 0{,}93\angle -3^\circ A$$

Y por tanto se obtiene la caída de tensión en el transformador:

$$\mathcal{I}_2^{'} \cdot \mathcal{Z}_{cc} = (0{,}93A\angle -3^\circ) \cdot (20{,}58 + j53{,}69)\Omega = (0{,}93\angle -3^\circ)A \cdot (57{,}61\angle 69{,}02^\circ)\Omega$$

$$\mathcal{V}_1 - \mathcal{V}_2^{'} = \mathcal{I}_2^{'} \cdot \mathcal{Z}_{cc} = 53{,}93\angle 66{,}02^\circ V$$

Aunque el enunciado del problema no lo pide, la caída de tensión en la carga es:

$$\mathcal{V}_C^{'} = \mathcal{I}_2^{'} \cdot \mathcal{Z}_c = 0{,}93\angle -3^\circ A \cdot 14.400\Omega = 13.392\angle -3^\circ V$$

y por tanto la caída de tensión real de fase en la carga se obtiene a partir de la relación de transformación r_t:

$$r_t = \frac{V_1}{V_2} = \frac{24.000V}{400} = 60$$

$$V_C = \frac{V_C^{'}}{r_t} = \frac{13.392V}{60} = 223{,}2V$$

$$\mathcal{V}_C = V_C\angle -3^\circ = 223{,}2\angle -3^\circ V$$

La caída de tensión real de línea en la carga resulta:

$$\mathcal{V}_{CL} = \sqrt{3}V_C\angle -3^\circ + 30^\circ = 386{,}59\angle 27^\circ V$$

m) *Si se desea ampliar la potencia de la instalación hasta los 600kVA, indica, ayudándote de la tabla adjunta, cómo modificarías la instalación.* **(1 punto)**

Ver apartado **3.12 Acoplamiento en paralelo de transformadores**, pág. 249.