Ingeniería Eléctrica
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS
UNIVERSIDAD DE CHILE

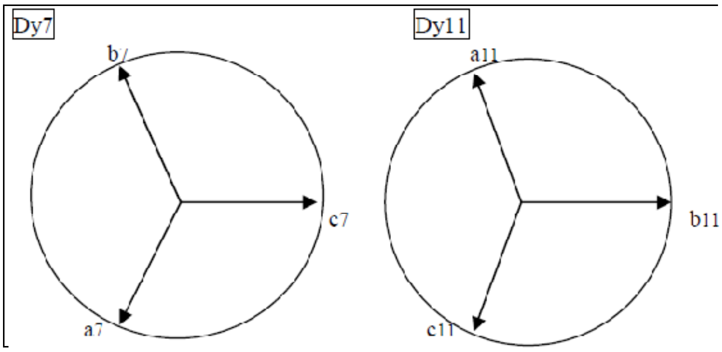
Profesores : Jorge Romo L.
Alfredo Muñoz R.
Profesor Auxiliar : Eduardo Zamora D.
Tiempo : 2,0 hrs
Fecha : 29/10/2010

EL4001 – Conversión de la Energía y Sistemas de Eléctricos

Pauta Control 2

Problema 1: Profesor, Jorge Romo

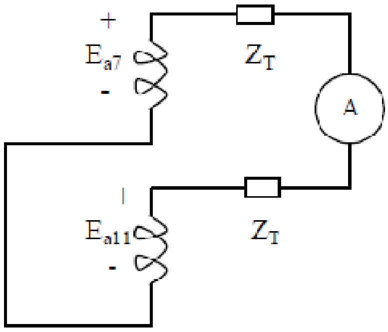
Parte a) (i) Los voltajes fase neutro de los secundarios son:



Lectura de V1 = $|V_{b7} - V_{a11}|$ = **0 [Volts]**

Lectura de V2 = $|V_{a7} - V_{a11}|$ = $|\sqrt{3}\cdot V_{fn} \angle{-180^o}|$ = V_{ff} = **400 [Volts]**

(ii) El circuito cerrado a través del amperímetro es:



Donde $Z_T = 0{,}08\cdot(0{,}4^2/0{,}45) = 0{,}0284\ \Omega_{BT}$

$\Longrightarrow E_{a7} - E_{a11} = 2\cdot Z_T\cdot I_A$

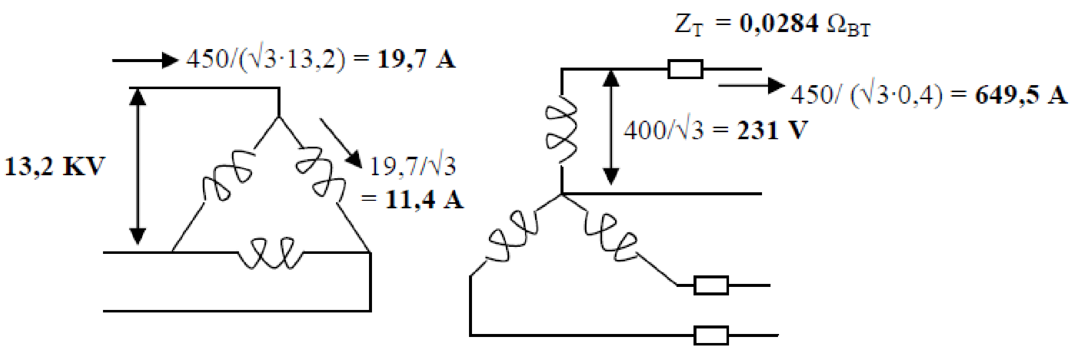
Trabajando con módulos:

$|-j400| = 2\cdot 0{,}0284\cdot I_A$

$\Longrightarrow$ **I_A = 7031 Amp**.

(iii) Deben conectarse terminales que tengan diferencia de potencial = 0. Es decir: a7 con c11; b7 con a11; c7 con b11.

(iv) El esquema es:



Luego, cada transformador monofásico es de:

450/3 = 150 [kVA]	13,2/0,231 [kV]	50 [Hz]	Z_{T1} = 8 % (*)	11,4/649,5 [A]

[(*) Obs: la impedancia es 0,0284 Ω_{BT} = 0,0284/(0,231^2/0,150) = 0,08 º/1 **= 8%**; no cambia con respecto al trifásico]

Parte b)

Motor de Referencia: $P_{3\phi} = \sqrt{3}\cdot 4160\cdot 41{,}5\cdot 0{,}84$ [W] = 251,18 [KW]

==> costo de operación C_{ref} = 251,18·7200·0,2 = US\$ 361.696.-/año.

Motor Opción (i): $P_{3\phi} = \sqrt{3}\cdot 4160\cdot 40{,}2\cdot 0{,}85$ [W] = 246,21 [KW]

==> costo de operación $C_{(i)}$ = 246,21·7200·0,2 = US\$ 354.537.-/año. ==> Ahorro = **US\$ 7.159.-/año**

Motor Opción (ii): $P_{3\phi} = \sqrt{3}\cdot 4160\cdot 38{,}5\cdot 0{,}85$ [W] = 235,79 [KW]

==> costo de operación $C_{(ii)}$ = 235,79·7200·0,2 = US\$ 339.544.-/año. ==> Ahorro = **US\$ 22.152.-/año**

Motor de Opción (iii): $P_{3\phi}$ = 251,18 – 4 = 247,18 [KW]

==> costo de operación $C_{(iii)}$ = 247,18·7200·0,2 = US\$ 355.939.-/año. ==> Ahorro = **US\$ 5.757.-/año**

Comparando con las inversiones, donde a (i) e (ii) se les descuenta el costo residual de US\$7.500.-, se tiene:

Opción	Ahorro/año	US\$ Inversión	Período Amortización
(i)	7.159.-	11.800.-	1,65 años
(ii)	22.152.-	18.500.-	0,84 años
(iii)	5.757.-	6.000.-	1,04 años

Las cifras indican que la mejor opción es (ii), Motor nuevo Eficiente.

Parte c) (i) s_{nom} = (1500-1443)/1500 = 0,038

$\omega_{s\,20Hz}$ = 120·20/4 = 600 rpm. ==> $\omega_r = \omega_{s\,20Hz}\cdot(1 - 0{,}038)$ = **577,2 rpm**.

(ii) Con partidor Y-Δ:

Para la partida en Δ la corriente de línea es: $I_{pL\Delta}$ = 5·38,5 = 192,5 Amp.

Pero si se hace partir en Y, se tiene: $I_{pLY} = I_{pL\Delta}/3$ = **64,2 Amp**

Con partida en delta a 832 Volts ff, 10 Hz:

Hay que evaluar la impedancia por enrollado a la partida a esa frecuencia: $Z_{m\,50Hz} = 4160/(5\cdot 38{,}5/\sqrt{3})$ <60º = 37,43<60º = 18,7 + j32,4.

Luego, a 20 Hz: $Z_{m\,20Hz}$ = 18,7 + j(20/50)·32,4 = 18,7 + j6,5 = **19,8<19º.**

Entonces, $I_{enroll\,20Hz}$ = 832/19,8 = 42 Amp ==> $I_{pL\Delta\,20Hz} = \sqrt{3}\cdot 42$ = **78,8 Amp**.

<u>Problema 2: Ayudante, Piero Izquierdo</u>

Parte a)

Parámetros en pu.

$Z_{L0}=\dfrac{(1.5+j2)\Omega}{\frac{(66kV)^2}{75MVA}}=0.0430\angle 53.13$	$Z_{T0}=0.12\angle 80\cdot\dfrac{\frac{(66kV)^2}{120MVA}}{\frac{(66kV)^2}{75MVA}}=0.0750\angle 80$
$Z_{L1}=\dfrac{(2+j3)\Omega}{\frac{(66kV)^2}{75MVA}}=0.0621\angle 56.31$	$Z_{T1}=\dfrac{(0.57\angle 75)\Omega}{\frac{(12kV)^2}{75MVA}}=0.099\angle 75$
$Z_{L2}=\dfrac{(2.5+j4)\Omega}{\frac{(66kV)^2}{75MVA}}=0.0812\angle 57.99$	$Z_{T2}=\dfrac{(4.5\angle 70)\Omega}{\frac{(66kV)^2}{75MVA}}=0.0775\angle 70$
$V_S=\dfrac{11.1kV}{12kV}=0.925$	
$S=\dfrac{60MVA}{75MVA}\angle\cos^{-1}0.85=0.8\angle 31.79$	$Z_2=\dfrac{(3.68+j1.46)\Omega}{\frac{(12kV)^2}{75MVA}}=2.0620\angle 21.64$

Referencia de voltaje en el consumo S

$$V_S=0.925\angle 0$$

$$V_1=(Z_{L1}+Z_{T1})\cdot I_1+V_S$$

Pero $S=V_S\cdot I_1^* \implies I_1^*=\left(\frac{S}{V_S}\right)^*=0.8649\angle-31.79$

$$V_1=(Z_{L1}+Z_{T1})\cdot\left(\frac{S}{V_S}\right)^*+V_S=1.0394\angle 4.46$$

En la otra rama

$$V_1=(Z_{L2}+Z_{T2}+Z_2)\cdot I_2$$

$$I_2=\frac{V_1}{(Z_{L2}+Z_{T2}+Z_2)}=0.4765\angle-19.97$$

$$I_0=I_1+I_2=1.3349\angle-27.60$$

Finalmente

$$V_0=(Z_{T0}+Z_{L0})\cdot I_0+V_1=1.1639\angle 9.14$$
$$=16.06[kV]$$

En el transformador T_2

Corriente de línea AT	$I_2 \cdot \frac{30MVA}{\sqrt{3} \cdot 66kV} = 125.05[A]$
Corriente de línea BT	$I_2 \cdot \frac{30MVA}{\sqrt{3} \cdot 12kV} = 687.77[A]$
Corriente de enrollado AT	$I_2 \cdot \frac{30MVA}{\sqrt{3} \cdot 66kV} = 125.05[A]$
Corriente de enrollado BT	$I_2 \cdot \frac{30MVA}{\sqrt{3} \cdot 66kV} \cdot \frac{1}{\sqrt{3}} = 72.20[A]$

Parte b)

Referencia en el generador $V_0 = 1.1639\angle 0$, $S = 0.8\angle 33.90$

$$V_0 = (Z_{T0} + Z_{L0} + Z_{l1} + Z_{T1}) \cdot I + V_S$$

$$V_0 = (Z_{T0} + Z_{L0} + Z_{l1} + Z_{T1}) \cdot \left(\frac{S}{V_S}\right)^* + V_S \qquad / \cdot V_S^*$$

$$V_0 \cdot V_S^* = (Z_{T0} + Z_{L0} + Z_{l1} + Z_{T1}) \cdot S^* + |V_S|^2$$

Parte Real:

$$|V_S| \cdot |V_0| \cdot \cos\theta_S = Real\{(Z_{T0} + Z_{L0} + Z_{l1} + Z_{T1}) \cdot S^*\} + |V_S|^2$$

Parte Imaginaria

$$-|V_S| \cdot |V_0| \cdot \sin\theta_S = Imag\{(Z_{T0} + Z_{L0} + Z_{l1} + Z_{T1}) \cdot S^*\}$$

Resolviendo

$$V_S = 0.9718\angle -6.37$$

$$V_S = 11.66[kV]$$

Considerando $V_0 = 1$

$$V_S = 0.7442\angle -9.71$$

$$V_S = 8.93[kV]$$

<u>Problema 3: Ayudante, Enrique Guerrero</u>

Parte a) Interesa primero encontrar la corriente nominal. Como no existen más datos de referencia, se utilizarán aquellos proporcionados por el enunciado. El modelo a considerar, dado que el motor es serie, se muestra en la Figura 1.

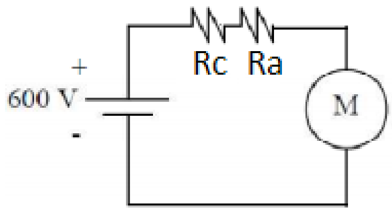


Figura 1: modelo del motor serie

La velocidad nomina, en rpm, debe ser convertida a [rad/s]. De este modo

$$\omega_{nom} = 1335 \cdot \frac{2\pi}{60} = 139,8009[rad/s]$$

De ahí se tiene que $I_{nom} = \dfrac{V_{nom}}{R_a + R_c + G\omega_{nom}} = \dfrac{600}{0,5 + 0,05 \cdot 139,8009} = 80,1063[A]$

$$\therefore\ 1,2 \cdot I_{nom} = 96,1276[A]$$

A la partida, $G\omega I = 0$. Considerando el modelo de la Figura 2, se tiene

$$\frac{600}{R_o + 1} = 96,1276 \Rightarrow R_o = 5,2417[\Omega]$$

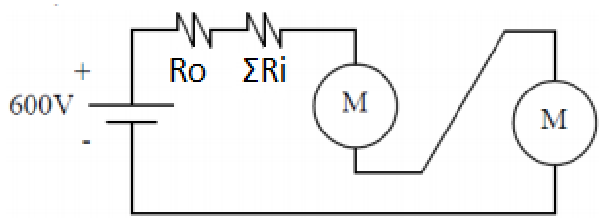


Figura 2: modelo del problema 3 (a)

Sabemos $\tau_{mec} = GI^2 \Leftrightarrow \tau_{mec} = \dfrac{0,05 \cdot 600^2}{(6,2417 + 0,1\omega)^2}$, pues sabemos que $I = \dfrac{600}{R_o + 2 \cdot (R_a + R_c + G\omega)}$.

En régimen permanente, $2\tau_{mec} = \tau_{res}$

$$\Rightarrow \frac{0,1 \cdot 600^2}{(6,2417 + 0,1\omega)^2} = 12,5 + 5,5\omega$$

$$\Rightarrow 0 = \omega^3(0,1^2 \cdot 5,5) + \omega^2(12,5 \cdot 0,1^2 + 0,2 \cdot 6,2417 \cdot 5,5)$$ [1]

$$+\omega(0,2 \cdot 6,2417 \cdot 12,5 + 6,2417^2 \cdot 5,5) + 6,2417^2 \cdot 12,5 - 0,1 \cdot 600^2$$

[1] Se recomienda ingresar los datos así a la calculadora. Se ahorra bastante tiempo de cálculo.

Con esto,

$$\omega = \begin{cases} 49,7510[rad/s] \\ 113,9230\angle 140,92^{o} \\ 113,9230\angle -140,92^{o} \end{cases}$$

Claramente se escoge la primera solución. Es la única real.

Luego

$$\omega = 49,7510[rad/s] \rightarrow 475,0871[rpm]$$
$$\Rightarrow u = 28,5052[km/h]$$

Parte b) Ahora tenemos que $R_o = 1,0483[\Omega]$. Se tiene ahora el esquemático de la Figura 3.

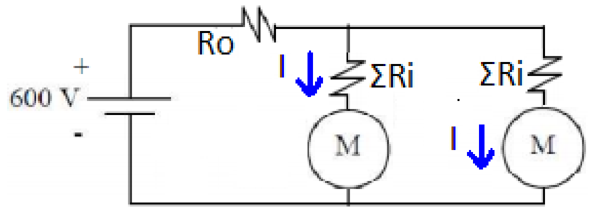


Figura 3: esquema para la pregunta 3 (b)

De LVK, $600 = (2\cdot 1,0483 + 0,5 + 0,05\omega)\cdot I \Rightarrow \tau_{mec} = \dfrac{600^2 \cdot 0,05}{(2,0967 + 0,5 + 0,05)^2}$

$$2\tau_{mec} = \frac{600^2 \cdot 0,1}{(2,5967 + 0,05)^2} = 12,5 + 5,5\omega = \tau_{res}$$
$$\Leftrightarrow 0 = \omega^3(0,05^2 \cdot 5,5) + \omega^2(12,5 \cdot 0,05^2 + 0,1 \cdot 2,5967 \cdot 5,5)$$
$$+\omega(0,1 \cdot 2,5967 \cdot 12,5 + 2,5967^2 \cdot 5,5) + 2,5967^2 \cdot 12,5 - 0,1 \cdot 600^2$$

Y entonces $\omega = \begin{cases} 104,5912[rad/s] \\ 158,0314\angle 131,82^{o} \\ 158,0314\angle -131,82^{o} \end{cases}$. Nuevamente se escoge la primera solución, con la cual

$$\omega = 104,5912[rad/s] \rightarrow 998,7724[rpm]$$
$$\Rightarrow u = 59,9263[km/h]$$

El rendimiento del conjunto viene dado por $\eta_R = \dfrac{P_{mec}}{P_{elec}^R} = 0,6682$, pues

$$P_{elec}^{R} = \frac{600^2}{1,0483 + 0,25 + 0,025\omega} = 91,9991[kW]$$ [2]

Y por otro lado

$$P_{mec} = \tau_{res}\omega = 61,4736[kW]$$

Parte c) Calculemos el voltaje efectivo de los motores tal que se alcanza la velocidad en (b).

$$\tau_{mec} = G\cdot\left(\frac{\bar{V}}{R_a + R_c + G\omega}\right)^2 = \frac{0,05\bar{V}^2}{(0,5+0,05\omega)^2}$$

$$2\tau_{mec} = \tau_{res} \Leftrightarrow \frac{0,1\bar{V}^2}{(0,5+0,05\omega)^2} = 12,5 + 5,5\omega\Big|_{\omega=104,5912[rad/s]}$$

$$\bar{V} = 10\cdot\sqrt{(12,5+5,5\omega)\cdot(0,5+0,05\omega)^2}\Big|_{\omega=104,5912[rad/s]} = 439,2565[V]$$

Obtengamos ahora el tiempo de conducción que esto implica. Sabemos que

$$\frac{\bar{V}}{V} = \frac{T_c}{T} \Rightarrow T_c = \frac{\bar{V}}{fV} = \frac{439,2565}{2k\cdot 600}$$

$$T_c = 366,0471[\mu s]$$

Ahora,

$$P_{elec}^{CH} = 2\cdot\frac{439,2565^2}{0,5+0,05\omega} = 67,3512[kW]$$

Y la potencia mecánica es la misma que la desarrollada en (b), con lo que

$$\eta_{CH} = 0,9127$$

Según es posible comprobar, la resistencia serie consume muchísima potencia al circular por ella la corriente que abastece ambas máquinas. El Chopper, por otro lado, detiene completamente la conducción en cierto intervalo de tiempo, de modo que, en vez de disipar energía, impide que ésta circule hacia los motores, de modo de regular la velocidad. No sorprende entonces que el aumento en el rendimiento de las máquinas sea tan grande, hallándose el último valor dentro de los valores típicos de rendimiento de máquinas c.c.

[2] Nótese en este punto la analogía que se hace con V^2/R. Justamente en este caso, la contra f.e.m. ejercida por el motor tiene un comportamiento similar a una resistencia más. La resistencia equivalente sale del paralelo de ambas máquinas (consideradas como una resistencia) en serie con R_o.