1/161

INSTITUTO DE INGENIERIA ELECTRICA - Departamento de POTENCIA

Curso de Máquinas Eléctricas (5602) – Examen Diciembre 2013 – 9 de Diciembre 2013.

Examen Total

17

Problemas - Total 50% del examen (eliminatorio): Prob.1): 25% - Prob.2): 25%

Problema No. 1 (25%)

Se considera una central de generación que tiene 2 grupos generadores independientes e idénticos, constituidos por 1 motor primario + 1 alternador. Los alternadores se conectan a la misma barra trifásica, supuesta de potencia infinita, pero no directamente sino cada uno mediante un transformador de aislación de relación 1:1. Los alternadores son de reactancia sincrónica 0.5 p.u. y de $\cos\varphi_{nom}$ =1. Los transformadores, de corriente de vacío despreciable, son iguales en todo excepto en su u_{cc}%: uno es de reactancia 0.1 p.u y el otro de 0.3 p.u. . Se toma como base de tensiones (1 p.u.) la tensión de la barra, y como base de potencia (1 p.u.) la potencia aparente nominal de cada grupo.

Se pide:

1) (10/25) Con ambos alternadores en vacío (sin potencia mecánica en su eje) se regulan las excitaciones de ambos para que sus corrientes de estator sean nulas. Luego a la barra de la central se conecta una carga que consume 2 p.u. de potencia activa, y cada motor primario de los generadores se regula de forma de entregar 1 p.u. de potencia. Calcular los valores en p.u. de las corrientes resultantes de ambos alternadores.
2) (8/25) Indicar cómo deben ajustarse las corrientes de excitación en p.u. de ambos alternadores para que, con la carga eléctrica y la potencia mecánica de 1), se minimice la corriente de línea de ambos generadores.
3) (7/25) Calcular la tensión y el factor de potencia en bornes de cada alternador en las condiciones anteriores.

Notas: a) Se supondrá que las máquinas no tienen pérdidas de ningún tipo, ni saturación magnética. b) Se admite que las impedancias sincrónicas son constantes para todo el problema.

Problema No. 2 (25%)

Una planta industrial está conectada a la red trifásica de 6 kV, 50 Hz, supuesta de potencia infinita, mediante una línea trifásica de impedancia $X\ell$. En la barra B2 de la planta tiene instalada una máquina sincrónica trifásica MS para autogeneración. MS, funcionando como alternador, es movida a su velocidad nominal por un motor primario (no representado) que puede dar una potencia mecánica de 100 kW al eje del alternador.

Datos:

$X\ell$ = 50 Ohm por fase (supuesta puramente inductiva)

MS: 125 kVA, 6 kV, 50 Hz, trifásica conectada en estrella, rotor cilíndrico.

Ensayo en vacío:

i_{exc} (A)	5	10	15	20	25	30	39
U_0 (entre fases) (kV)	2.20	4.40	6.00	6.88	7.49	7.82	8.25

Ensayo en cortocircuito: i_{exc} = 10 A, I_{cc} = 12 A

Ensayo en devatado bajo tensión nominal: i_{exc} = 28.33 A, I_d = 12 A.

FACULTAD DE INGENIERIA
Depto. De Documentación y Biblioteca
Montevideo - Uruguay

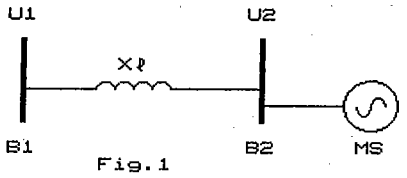


Fig.1

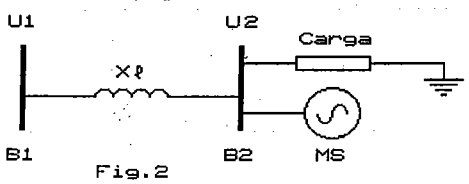


Fig.2

Se pide:

1) (5/25) En la barra B2 de la planta se conecta una carga puramente resistiva que a U2= 6 kV consume 100 kW. Con la potencia mecánica de 100 kW aplicada al eje de MS (fig.2), y suponiendo que la tensión U2 = 6kV, mostrar que la corriente tomada de la red es nula.
2) (13/25) Para el funcionamiento indicado en 1) determinar la corriente de excitación para que

17 2161

INSTITUTO DE INGENIERIA ELECTRICA - Departamento de POTENCIA
Curso de Máquinas Eléctricas (5602) – Examen Diciembre 2013 – 9 de Diciembre 2013.

U2 = 6 kV y calcular la corriente de MS en ese funcionamiento. Emplear el método de Potier, determinando los parámetros correspondientes.

3) (7/25) Suponiendo ahora que sin modificar la corriente de excitación ni la potencia mecánica del eje de MS respecto de los valores de 2), se desconecta la carga (fig. 1). Determinar el valor resultante de la tensión U2 y de la corriente de línea de MS.

Notas: a) Se despreciarán las pérdidas de MS. b) Se admite interpolaciones lineales en la curva de vacío. c) Para 3) se admitirá la aproximación de MS modelada como una fem E en serie con una reactancia sincrónica Xs, donde ambas dependen exclusivamente de la corriente de excitación.

Preguntas de Teórico – total 50% del parcial: 1): 25% - 2): 25%

1) <u>Fuerzas y pares en circuitos magnéticos (25%)</u>

Se tiene un convertidor electromecánico de rotación con 2 bobinas eléctricas, una en el rotor (subíndice 1) y otra en el estator (subíndice 2). Se conoce la matriz de los flujos totales ψ_1 y ψ_2 enlazados por ambas bobinas en función de las corrientes:

$$\begin{bmatrix}\psi_1\\ \psi_2\end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_1 & M\cos\theta \\ M\cos\theta & L_2\end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_1 \\ i_2\end{bmatrix}$$

Donde θ representa la coordenada angular de posición del rotor. El dispositivo trabaja en régimen lineal, las inductancias L_1, L_2 y M son constantes.

<u>Se pide (justificando las respuestas):</u>

a) (5/25) Determinar la expresión del par electromagnético Γ de este dispositivo.

b) (10/25) Suponiendo que el rotor está girando a una velocidad dada Ω, constante, que la corriente i_1 es continua, de valor constante, y que la corriente i_2 es alterna sinusoidal de pulsación eléctrica ω, indicar cuál debe ser la frecuencia de i_2 (o su pulsación eléctrica) para que el par electromagnético medio sea distinto de cero.

c) (10/25) Suponiendo que el bobinado 1 tiene resistencia despreciable (=0 en la práctica) y, a diferencia de b) se encuentra ahora <u>cortocircuitado</u>, determinar la expresión del par electromagnético Γ en este caso e indicar cuál debe ser la frecuencia de i_2 para que el par electromagnético medio sea distinto de cero cuando el rotor gira a velocidad Ω constante.

2) <u>Máquina Sincrónica de polos salientes en régimen lineal. Ensayo de deslizamiento. (25%)</u>

Explicar el ensayo que permite determinar los parámetros Xd y Xq de las MS de polos salientes. Indicar la forma de realización del ensayo, las medidas o registros a tomar, y la forma de cálculo de los parámetros Xd y Xq. Indicar, si es el caso, precauciones especiales que deban adoptarse durante el ensayo, y porqué.

FACULTAD DE INGENIERIA
Depto De Documentación y Biblioteca
Montevideo - Uruguay

31/161

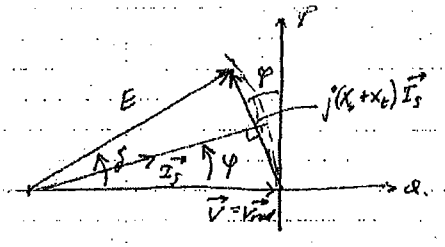
INSTITUTO DE INGENIERIA ELECTRICA - Departamento de POTENCIA
Curso de Máquinas Eléctricas (5602) – Examen Diciembre 2013 – 9 de Diciembre 2013.

17

Ex Dic. 2013. Pb. 1

(1)

1) Cada grupo generador entrega 1.0 pu de potencia activa.
Previamente se reguló la excitación de cada grupo para que la corriente de línea de c/c sea = 0. $\Rightarrow E_1 = E_2 = V$ (entre fases)



$E = V$ (por fase, en el equiv)

por simetría del triángulo isósceles

$\Rightarrow \varphi = \delta/2$

$$P_1 = \frac{3V_1E_1}{X'_{S_1}}\sin\delta_1 \quad , \quad \text{con } X'_{S_1} = X_{S_1} + X_{b_1}$$

base de tensiones: $V_b = V_n$ (V_n = tensión nominal de fase)
base de potencias: $S_b = S_n = 3V_nI_n \Rightarrow I_b = \frac{S_b}{3V_b} = \frac{S_n}{3V_n}$
base de impedancias: $Z_b = \frac{V_n}{I_n} = \frac{V_n}{\left(\frac{S_n}{3V_n}\right)} = \frac{3V_n^2}{S_n} = \frac{U_n^2}{S_n}$

$$P_1(p.u) = \frac{P_1}{S_n} = \frac{\cancel{3}V_1E_1}{\cancel{3}V_nI_n}\cdot\frac{1}{X'_{S_1}}\sin\delta_1 = \overset{=\delta_1}{v_1}\cdot\underbrace{\frac{E_1}{V_n}}_{e_1}\cdot\overbrace{\frac{V_n}{I_n}}^{=Z_b}\cdot\underbrace{\frac{1}{X'_{S_1}}}_{\frac{1}{x'_{S_1}}}\sin\delta_1$$

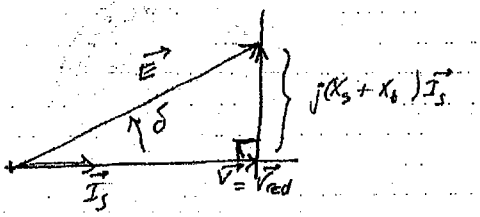
$$P_1(p.u) = \frac{\overset{=1}{v_1}\cdot\overset{=1}{e_1}}{x'_{S_1}}\sin\delta_1 = 1$$

$$\Rightarrow \quad \sin\delta_1 = x'_{S_1} = (0{,}5+0{,}1) = 0{,}6 \Rightarrow \delta_1 = 36{,}87^\circ \quad \varphi_1 = 18^\circ{,}435$$
$$\sin\delta_2 = x'_{S_2} = (0{,}5+0{,}3) = 0{,}8 \Rightarrow \delta_2 = 53{,}13^\circ \quad \varphi_2 = 26^\circ{,}565$$

$$(x'_{S_1}\, i_{S_1})^2 = v_1^2 + e_1^2 - 2v_1e_1\cos\delta_1 \Rightarrow i_1 \text{, igual para grupo 2}$$

$$i_1^2 = \frac{1^2+1^2-2\cos 36^\circ{,}87}{0{,}6^2} = 1{,}11 \Rightarrow \boxed{i_1 = 1{,}054 \text{ pu.}}$$
$$i_2^2 = \frac{1^2+1^2-2\cos 53{,}13}{0{,}8^2} = 1{,}25 \Rightarrow \boxed{i_2 = 1{,}118 \text{ p.u.}}$$

2) Para minimizar la corriente de línea, a $P = cte = 1$ pu, debe ser $\varphi = 0$ entre $\vec{V}_{red}$ e $\vec{I_s}$



$$P = 3V_{red}I_s\underbrace{\cos\varphi}_{=1} = 3V_sI_s$$

$$p = \frac{3V_{red}I_s}{3V_nI_n} = \underbrace{v}_{=1}\cdot i = 1$$

$$\Rightarrow \boxed{i_1 = i_2 = 1}$$

$$\Rightarrow e_1^2 = v_1^2 + (x'_{S_1}\, i_1)^2 \Rightarrow \boxed{e_1 = 1{,}1662 \text{ p.u.}}$$
$$e_2^2 = v_2^2 + (x'_{S_2}\, i_2)^2 \Rightarrow \boxed{e_2 = 1{,}2806 \text{ p.u}}$$

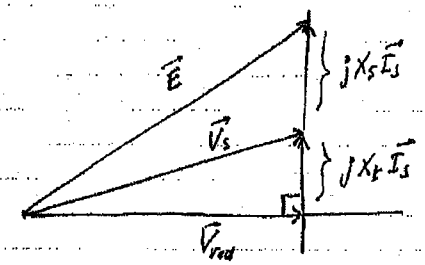
FACULTAD DE INGENIERIA
Depto. De Documentación y Biblioteca
Montevideo - Uruguay

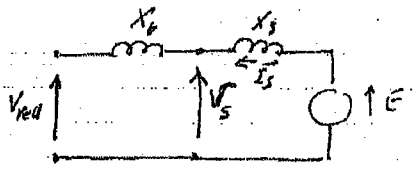
17 4/16

INSTITUTO DE INGENIERIA ELECTRICA - Departamento de POTENCIA
Curso de Máquinas Eléctricas (5602) – Examen Diciembre 2013 – 9 de Diciembre 2013.

②

3)





$$V_{s_1}^2 = V_{red}^2 + (X_t I_s)^2$$

$$v_{s_1}^2 = \underset{1}{v_{red}^2} + (\underset{1}{x_{t_1} i_{s_1}})^2 = 1 + (0{,}1)^2 = 1{,}01 \Rightarrow \boxed{v_{s_1} = 1{,}005}$$

$$v_{s_2}^2 = v_{red}^2 + (x_{t_2} i_{s_2})^2 = 1 + (0{,}3)^2 = 1{,}09 \Rightarrow \boxed{v_{s_2} = 1{,}044}$$

$$P = 3 V_1 I_1 \cos\varphi_1$$

$$\underset{1}{p\,(p.u)} = \frac{3 V_1 I_1 \cos\varphi_1}{3 V_n I_n} = \underset{1{,}005}{v_1}\,\underset{1}{i_1} \cos\varphi_1 \Rightarrow \boxed{\cos\varphi_1 = \frac{1}{1{,}005} = 0{,}9950}$$

$$\varphi_1 = 5°{,}71$$

$$\Rightarrow \boxed{\cos\varphi_2 = \frac{1}{1{,}044} = 0{,}9578}$$

$$\varphi_2 = 16°{,}70$$

FACULTAD DE INGENIERIA
Depto. De Documentación y Biblioteca
Montevideo - Uruguay

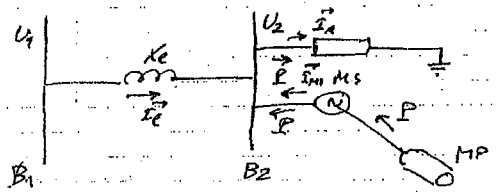
5/161

INSTITUTO DE INGENIERIA ELECTRICA - Departamento de POTENCIA

Curso de Máquinas Eléctricas (5602) – Examen Diciembre 2013 – 9 de Diciembre 2013.

17

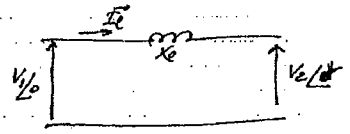
Pb. 3) Dic. 2013 ①



$P = 100\ kW$

1) De la red no se toma Potencia activa, dado que $P = 100\ kW$, es generada por MS (supuesta sin pérdidas) y entregada en la carga, pues, suponiendo $U_2 = 6\ kV$ (entre fases) es $P = 100\ kW$.

Entonces: en sistema 1 por fase (o fase-N)



$$P_{red} = \frac{3 V_1 V_2}{X_\ell} \sin\delta = 0$$

como $V_1 = V_2 = V_n = \frac{6\ kV}{\sqrt{3}} \neq 0$ $\Rightarrow \boxed{\delta = 0}$

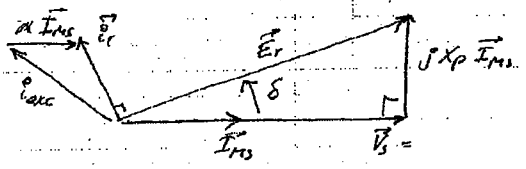
$$V_1\angle 0 = j X_\ell \vec{I}_\ell + V_2\angle 0 \Rightarrow \boxed{\vec{I}_\ell = 0\angle 0}$$

$j X_\ell \vec{I}_\ell = 0$

2) En B2 se aplica una carga puramente resistiva y se corrige la excitación para que $U_2 = U_1 = 6\ kV$.

$\Rightarrow$ la carga absorbe toda la potencia P generada por MS. $\left\{ \begin{array}{l} \vec{I}_{MS} = \vec{I}_R \\ \vec{I}_\ell = 0 \end{array} \right.$

Determinación de i_{exc} por método de Potier.



$$P = 100\ kW = 3 V_s I_{MS} \underbrace{\cos\varphi}_{1} \Rightarrow \boxed{I_{MS} = \frac{100 \cdot 10^3}{3 \cdot \frac{6000}{\sqrt{3}}} = 9{,}6225\ A}$$

Determinación de los parámetros de Potier: $\boxed{\begin{array}{l} \alpha = 0{,}646 \\ X_p = 49{,}3\ \Omega \end{array}}$ Ver hoja ③

$$E_r^2 = V_s^2 + (X_p I_{MS})^2 = \left(\frac{6000}{\sqrt{3}}\right)^2 + (49{,}3 \cdot 9{,}6225)^2 \Rightarrow E_r = 3496{,}4\ V$$

$$\sqrt{3}\, E_r = 6056\ V \Rightarrow \cos\delta = \frac{6000}{6056} = 0{,}9908 \Rightarrow \delta = 7°{,}798$$

$$i_r = 15 + \frac{20-15}{6{,}88-6{,}00}(6{,}056 - 6{,}00) = 15{,}318\ A$$

$$i_{exc}^2 = i_r^2 + (\alpha I_{MS})^2 + 2 i_r \alpha I_{MS} \sin\delta$$

$$i_{exc} = \sqrt{15{,}318^2 + (0{,}646 \cdot 9{,}6225)^2 + 2 \cdot 15{,}318 \cdot 0{,}646 \cdot 9{,}6225 \sin 7°{,}798}$$

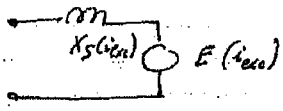
$$\boxed{i_{exc} = 17{,}295\ A}$$

FACULTAD DE INGENIERIA
Depto. De Documentación y Biblioteca
Montevideo - Uruguay

INSTITUTO DE INGENIERIA ELECTRICA - Departamento de POTENCIA
Curso de Máquinas Eléctricas (5602) – Examen Diciembre 2013 – 9 de Diciembre 2013.

3) $i_{exc} = 17{,}295\ A. \approx 17{,}3\ A. = cte.$; B_2 sin carga $\Rightarrow \vec{I}_R = 0$ pero $P_{mec} = P = 100\ kW$ $\Big\}$ U_2? I_{MS}?

MS: modelo

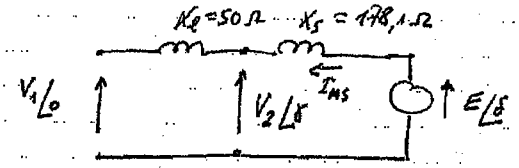


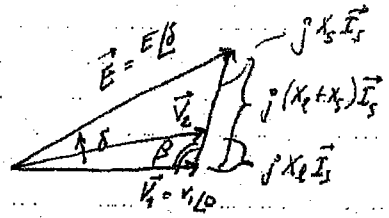
$$X_S(i_{exc}) = \frac{E(i_{exc})}{I_{cc}(i_{exc})}$$

$I_{cc}(i_{exc}) = k\, i_{exc}$: para $i_{exc} = 17{,}3\ A \Rightarrow I_{cc} = \frac{17{,}3}{10} \cdot 12 = 20{,}76\ A.$

$E(i_{exc})$ = interpolación en tabla : $\sqrt{3}E(17{,}3) = 6.00 + \frac{(6.88-6.00)}{(20-15)}(17{,}3-15) = 6{,}405\ kV$

$\Rightarrow E(17{,}3\ A) = 3{,}6971\ kV \Rightarrow \boxed{X_S(17{,}3\ A) = \frac{3697{,}8\ V}{20{,}76\ A} = 178{,}1\ \Omega}$





$$P = \frac{3V_1E}{(X_\ell + X_S)}\sin\delta \Rightarrow \sin\delta = \frac{P(X_\ell + X_S)}{3V_1E}$$

$$\sin\delta = \frac{100.10^3(50+178{,}1)}{3 \cdot \frac{6000}{\sqrt{3}} \cdot \frac{6405}{\sqrt{3}}} = 0{,}5935 \Rightarrow \boxed{\delta = 36{,}41°}$$

$$(X_\ell + X_S)^2 I_S^2 = E^2 + V_1^2 - 2EV_1\cos\delta \Rightarrow \boxed{I_S = \sqrt{\frac{(\frac{6405}{\sqrt{3}})^2 + (\frac{6000}{\sqrt{3}})^2 - 2 \cdot \frac{6405 \cdot 6000}{3}\cos 36{,}41}{(50+178{,}1)^2}} = 9{,}86\ A}$$

$$\cos\beta = \frac{V_1^2 + (X_S + X_\ell)^2 I_S^2 - E^2}{2V_1(X_S + X_\ell)I_S} = 0{,}2171 \Rightarrow \boxed{\beta = 77{,}458°}$$

$$V_2^2 = V_1^2 + (X_\ell I_S)^2 - 2V_1(X_\ell I)\cos\beta \Rightarrow V_2 = 3391{,}4\ V \Rightarrow \boxed{U_2 = 5874\ V} = 0{,}979\ pu$$

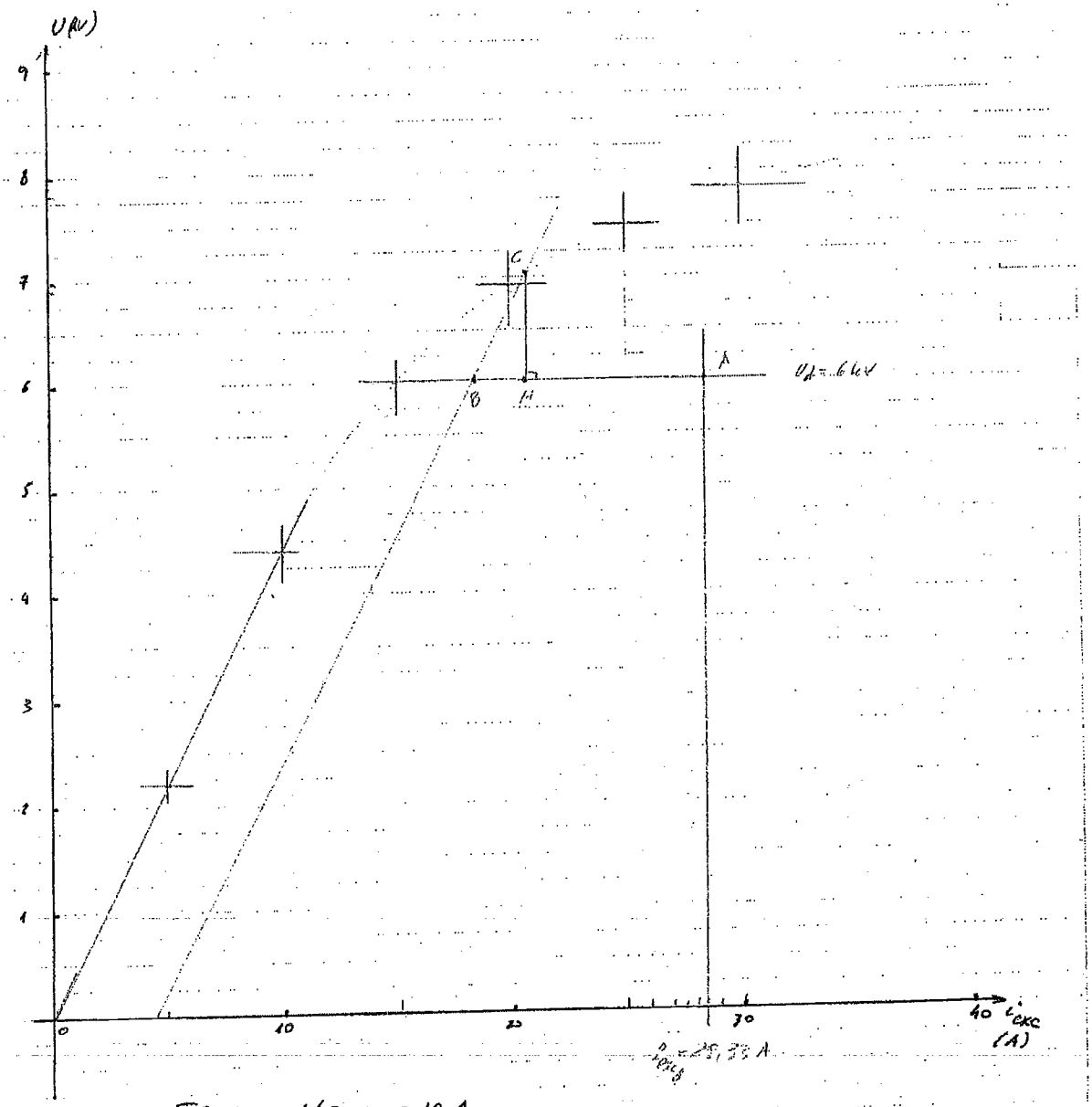
FACULTAD DE INGENIERIA
Depto. De Documentación y Biblioteca
Montevideo - Uruguay

7/161

97

INSTITUTO DE INGENIERIA ELECTRICA - Departamento de POTENCIA
Curso de Máquinas Eléctricas (5602) – Examen Diciembre 2013 – 9 de Diciembre 2013.

Pb. 2. Determinación de α y X_p (3)



Escalas: $\begin{cases} 40 \text{ mm} = 10 \text{ A} \\ 20 \text{ mm} = 1 \text{ kV} \end{cases}$

$$\left.\begin{array}{l} AH = \alpha I_{sd} = 31 \text{ mm} = 7{,}75 \text{ A} \\ CH = \sqrt{3} X_p I_{sd} = 20{,}5 \text{ mm} = 1{,}025 \text{ kV} \\ I_{sd} = 12 \text{ A} \end{array}\right\} \Rightarrow \boxed{\alpha = \frac{7{,}75 \text{ A}}{12 \text{ A}} = 0{,}646} \quad \boxed{X_p = \frac{1025 \text{ V}}{\sqrt{3} \cdot 12 \text{ A}} = 49{,}3 \ \Omega}$$

FACULTAD DE INGENIERIA
Depto. De Documentacion y Biblioteca
Montevideo - Uruguay

17

8/161

INSTITUTO DE INGENIERIA ELECTRICA - Departamento de POTENCIA
Curso de Máquinas Eléctricas (5602) – Examen Diciembre 2013 – 9 de Diciembre 2013.

(1)

Pregunta 2.

$$\begin{bmatrix}\psi_1\\ \psi_2\end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_1 & M\cos\theta \\ M\cos\theta & L_2\end{bmatrix}\begin{bmatrix} i_1\\ i_2\end{bmatrix} \qquad [\psi] = [\mathcal{L}(\theta)][i]$$

Régimen lineal:

$$\Gamma = \frac{1}{2}[i]^t\left[\frac{\partial \mathcal{L}}{\partial\theta}\right][i] \quad \text{(resultado general para sist. lineales)}$$

$$\Gamma = \frac{1}{2}\begin{bmatrix} i_1 & i_2\end{bmatrix}\frac{d}{d\theta}\begin{bmatrix} L_1 & M\cos\theta \\ M\cos\theta & L_2\end{bmatrix}\begin{bmatrix} i_1\\ i_2\end{bmatrix} =$$

$$\Gamma = -\frac{1}{2}\begin{bmatrix} i_1 & i_2\end{bmatrix}\begin{bmatrix} 0 & M\sin\theta \\ M\sin\theta & 0\end{bmatrix}\begin{bmatrix} i_1\\ i_2\end{bmatrix} = -\frac{1}{2}\begin{bmatrix} i_1 & i_2\end{bmatrix}\begin{bmatrix} M i_2\sin\theta \\ M i_1\sin\theta\end{bmatrix}$$

a) $\boxed{\Gamma = -M\, i_1 i_2 \sin\theta}$

b) $i_1 = cte = I_{10}$
$\theta = \theta(t) = \Omega t + \theta_0$
$i_2(t) = \sqrt{2}\, I_2 \cos(\omega t - \varphi)$

$$\Gamma = -M I_{10}\sqrt{2} I_2 \sin(-\Omega t + \theta_0)\cos(\omega t - \varphi)$$

$$\sin a \cos b = \frac{1}{2}\left[\sin(a+b) + \sin(a-b)\right]$$

$$\Gamma = -M I_{10}\sqrt{2} I_2 \frac{1}{2}\left\{\sin[\underbrace{(\Omega+\omega)}_{>0 \text{ siempre}} t + (\theta_0 - \varphi)] + \sin[\underbrace{(\Omega-\omega)}_{\gtrless ?} t + (\theta_0+\varphi)]\right\}$$

Para que $\Gamma_m = \frac{1}{T}\int_0^T \Gamma(t)\,dt \neq 0 \Rightarrow \boxed{\Omega = \omega}$ (coincide con la "condición de frecuencia")

$$\boxed{\Gamma_m = -\frac{\sqrt{2}}{2} M I_{10} I_2 \sin(\theta_0 + \varphi)}$$

c) Bobina 1 en cortocircuito:

$v_1 = r_1 i_1 + \frac{d\psi_1}{dt}$, si $r_1 = 0$, y $v_1 = 0 \Rightarrow \frac{d\psi_1}{dt} = 0$

como debe ser en alterna: $\Rightarrow \omega\vec{\psi}_1 = 0$

$\Rightarrow \underline{\underline{\psi_1 = 0}}$

$$0 = L_1 i_1 + M\cos\theta\, i_2$$
$$\psi_2 = M\cos\theta\, i_1 + L_2 i_2$$

$$i_1 = -\frac{M}{L_1}\cos\theta\, i_2 \Rightarrow \psi_2 = M\cos\theta\left(-\frac{M}{L_1}\cos\theta\, i_2\right) + L_2 i_2$$

$$\psi_2 = \underbrace{L_2\left[1 - \frac{M^2}{L_1 L_2}\cos^2\theta\right]}_{L_2(\theta)} i_2$$

$$\boxed{\Gamma = \frac{1}{2}\frac{\partial L_2}{\partial\theta} i_2^2}$$

FACULTAD DE I... Depto. Documentación y Biblioteca ... Uruguay

INSTITUTO DE INGENIERIA ELECTRICA - Departamento de POTENCIA
Curso de Máquinas Eléctricas (5602) – Examen Diciembre 2013 – 9 de Diciembre 2013.

(2)

$$\Gamma = \frac{1}{2} L_2 \left[-\frac{M^2}{L_1 L_2} \cdot 2\cos\theta(-\sin\theta) \right] i_2^2$$

$$\Gamma = \frac{M^2}{L_1} \underbrace{\sin\theta\cos\theta}_{\frac{1}{2}\sin 2\theta} \, i_2^2 \qquad \left(\sqrt{2}\, I_2 \cos(\omega t - \varphi)\right)^2$$

$$\Gamma = \frac{M^2 I_2^2}{L_1} \sin 2\theta \, \underbrace{\cos^2(\omega t - \varphi)}_{\frac{1+\cos 2(\omega t-\varphi)}{2}}$$

$$\boxed{\Gamma = \frac{1}{2} \frac{M^2 I_2^2}{L_1} \sin 2(\Omega t + \theta_0)\left[1 + \cos 2(\omega t - \varphi)\right]}$$

$$\Gamma = \frac{1}{2} \frac{M^2 I_2^2}{L_1} \left\{ \sin 2(\Omega t + \theta_0) + \underbrace{\sin 2(\Omega t + \theta_0)\cos 2(\omega t - \varphi)}_{\frac{1}{2}\left[\sin\left[2(\underbrace{\Omega+\omega}_{>0})t + 2(\theta_0 - \varphi)\right] + \sin\left[2(\underbrace{\Omega-\omega}_{\gtrless 0})t + 2(\theta_0 + \varphi)\right]\right]} \right\}$$

$$\Gamma_m = \frac{1}{T}\int_0^T \Gamma(t)\,dt \neq 0 \quad \text{sólo si } \boxed{\Omega = \omega}$$

, también coincidente con la "condición de frecuencia o de sincronismo)

Obs. conceptual: Este funcionamiento es similar al de una máquina de inducción "monofásica" (En este caso ideal serían monofásicos estator y rotor, ~~es~~ no como en las máquinas monofásicas de inducción, que sólo tienen monofásico el estator.)
Pero la condición de rotor con resistencia = 0 impone que el rotor no puede tener pérdidas, y por lo tanto el único funcionamiento posible es en el modo sincrónico $\omega = \Omega$.

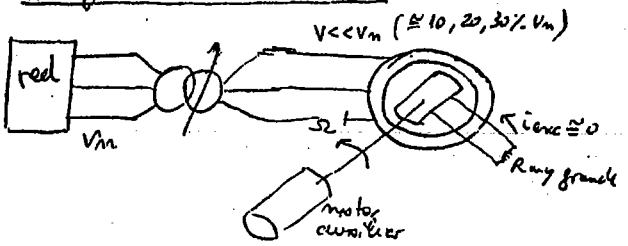
FACULTAD DE INGENIERIA
Depto. De Documentación y Biblioteca
Montevideo, Uruguay

17 10/16

INSTITUTO DE INGENIERIA ELECTRICA - Departamento de POTENCIA
Curso de Máquinas Eléctricas (5602) – Examen Diciembre 2013 – 9 de Diciembre 2013.

Det. de xd y xq.

Ensayo de deslizamiento



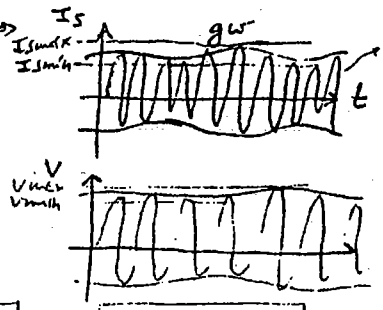
$\Omega' < \Omega_s$ pero $\Omega' \simeq \Omega_s$

$g = \frac{\Omega_s - \Omega'}{\Omega_s} \leq 1\%$.

Se conecta a tensión reducida. Se hace girar a $\Omega' \neq \Omega_s$ pero $\cong$

Trato de que $\vec{I}_{rotor} = 0$, aunque no dejo los bornes abiertos, coloco R muy grande ⇒ $i_{exc} \cong 0$. Esto es xq' ∃ riesgos de q' haya sobretensiones en devanado rotor (inductancia q' ve un campo variable, y no gira a Ω_s) ⇒ proveer camino para una I.

Voy girando, con $\Omega' \neq \Omega_s$ ⇒ a veces se ve xd y luego xq; pero xd > xq ⇒



→ aparece Is modulada (Is < cuando se ve xd q'es >, y > con xq)

→ V tb. aparece modulada, aunque menos

Luego $\boxed{x_q = \frac{V_{mín}}{I_{sm\acute{a}x}}}$; $\boxed{x_d = \frac{V_{máx}}{I_{sm\acute{i}n}}}$

Si este ensayo se hace a las ms de rotor liso, tb. encuentro xd ≠ xq. Esto es xq' tengo ranurado:

$\frac{x_q}{x_d} =$ → polos salientes ≃ 0,5 a 0,8
→ polos lisos ≃ 0,9 a 0,95

En rigor, todas las máq. tienen efectos de polos salientes.

Xq = Vmín/Ismáx
Xd = Vmáx/Ismín

FACULTAD DE INGENIERIA Depto. De Documentación y Biblioteca Montevideo - Uruguay

11/161

INSTITUTO DE INGENIERIA ELECTRICA - Departamento de POTENCIA

Curso de Máquinas Eléctricas (5602) – Examen Diciembre 2013 – 9 de Diciembre 2013. 17

Examen Parcial

Pregunta No. 1 (45%): Máquinas sincrónicas de polos lisos en régimen lineal

Se considera una central de generación que tiene 2 grupos generadores independientes e idénticos, constituidos por 1 motor primario + 1 alternador. Los alternadores, supuestos sin pérdidas de ningún tipo, ni saturación, se conectan a la misma barra trifásica, supuesta de potencia infinita, pero no directamente sino cada uno mediante un transformador de aislación de relación 1:1. Los alternadores son de reactancia sincrónica Xs p.u. y de $\cos\varphi_{nom}$ =1. Los transformadores, de corriente de vacío despreciable, son iguales en todo excepto en su u_{cc}%: uno es de reactancia Xt1 p.u y el otro de Xt2 p.u. . Se toma como base de tensiones (1 p.u.) la tensión de la barra, y como base de potencia (1 p.u.) la potencia aparente nominal de cada grupo.

Se pide:

1) (20/45) Con ambos alternadores en vacío (sin potencia mecánica en su eje) se regulan las excitaciones de ambos para que sus corrientes de estator sean nulas. Luego a la barra de la central se conecta una carga eléctrica que consume 2 p.u. de potencia activa, y cada motor primario de los generadores se regula de forma de entregar 1 p.u. de potencia. Expresar las ecuaciones que permiten determinar los valores en p.u. de las corrientes resultantes de ambos alternadores.
2) (12/45) Con la misma carga eléctrica y potencia mecánica en el eje de los alternadores que en 1), se quiere minimizar la corriente de línea de ambos generadores. Expresar las ecuaciones que permiten determinar los valores en p.u. de las tensiones internas (de excitación) de ambos alternadores.
3) (13/45) En las mismas condiciones de 2) expresar las ecuaciones que permiten determinar la tensión (en p.u.) y el factor de potencia en bornes de cada alternador.
4) (adicional: +5/45) Calcular los valores en p.u. de las magnitudes solicitadas en 1), 2) y 3), sabiendo que: Xs=0.5 p.u, Xt1=0.1 p.u., Xt2=0.3 p.u.

Pregunta No. 2 (35%): Fuerzas y pares en circuitos magnéticos

Se tiene un convertidor electromecánico de rotación con 2 bobinas eléctricas, una en el rotor (subíndice 1) y otra en el estator (subíndice 2). Se conoce la matriz de los flujos totales ψ_1 y ψ_2 enlazados por ambas bobinas en función de las corrientes:

$$\begin{bmatrix}\psi_1\\ \psi_2\end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_1 & M\cos\theta \\ M\cos\theta & L_2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_1 \\ i_2 \end{bmatrix}$$

Donde θ representa la coordenada angular de posición del rotor. El dispositivo trabaja en régimen lineal, las inductancias L_1, L_2 y M son constantes.

Se pide (justificando las respuestas):

1) (5/35) Determinar la expresión del par electromagnético Γ de este dispositivo.
2) (12/35) Suponiendo que el rotor está girando a una velocidad dada Ω, constante, que la corriente i_1 es continua, de valor constante, y que la corriente i_2 es alterna sinusoidal de pulsación eléctrica ω, indicar cuál debe ser la frecuencia de i_2 (o su pulsación eléctrica) para que el par electromagnético medio sea distinto de cero.
3) (18/35) Suponiendo que el bobinado 1 tiene resistencia despreciable (=0 en la práctica) y, a diferencia de b) se encuentra ahora cortocircuitado, determinar la expresión del par electromagnético Γ en este caso e indicar cuál debe ser la frecuencia de i_2 para que el par electromagnético medio sea distinto de cero cuando el rotor gira a velocidad Ω constante.

Pregunta No. 3 (20%): Máquina Sincrónica de polos salientes en régimen lineal. Ensayo de deslizamiento.

Hacer un diagrama y explicar el ensayo que permite determinar los parámetros Xd y Xq de las MS de polos salientes. Indicar la forma de realización del ensayo, las medidas o registros a tomar, y la forma de cálculo de los parámetros Xd y Xq. Indicar, si es el caso, precauciones especiales que deban adoptarse durante el ensayo, y porqué.

FACULTAD DE INGENIERIA
Depto. de Documentación y Biblioteca
Montevideo - Uruguay

(17) 12/16

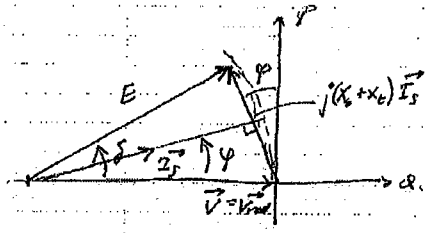
INSTITUTO DE INGENIERIA ELECTRICA - Departamento de POTENCIA
Curso de Máquinas Eléctricas (5602) – Examen Diciembre 2013 – 9 de Diciembre 2013.

Pregunta 1

Ex Dic. 2013 - Pb. 1

(1)

1) Cada grupo generador entrega 1.0 pu de potencia activa. Permanente se regula la excitación de cada grupo para que la corriente de línea de c/c sea = 0. ⇒ $E_1 = E_2 = V$ (entre fases)



$E = V$ (por fase, en el equiv)

por simetría del triángulo isósceles

$\Rightarrow \varphi = \delta/2$

$$P_1 = \frac{3 V_1 E_1}{X'_{s_1}} \sin\delta_1 \quad , \quad \text{con } X'_{s_1} = X_{s_1} + X_{t_1}$$

base de tensiones: $V_b = V_n$ (V_n = tensión nominal de fase)

base de potencias: $S_b = S_n = 3 V_n I_n \Rightarrow I_b = \frac{S_b}{3V_b} = \frac{S_n}{3V_n}$

base de impedancia: $Z_b = \frac{V_n}{I_n} = \frac{V_n}{\left(\frac{S_n}{3V_n}\right)} = \frac{3V_n^2}{S_n} = \frac{U_n^2}{S_n}$

$$P_1(p.u) = \frac{P_1}{S_n} = \frac{\cancel{3} V_1 E_1}{\cancel{3} V_n I_n} \cdot \frac{1}{X'_{s_1}} \sin\delta_1 = \overset{=\sigma_1}{\frac{V_1}{V_n}} \cdot \underbrace{\frac{E_1}{V_n}}_{e_1} \cdot \underbrace{\frac{V_n}{I_n} \cdot \frac{1}{X'_{s_1}}}_{\frac{1}{x'_{s_1}}} \sin\delta_1$$

$$P_1(p.u) = \frac{\overset{=1}{\sigma_1} \cdot \overset{=1}{e_1}}{x'_{s_1}} \sin\delta_1 = 1$$

$\Rightarrow$ $\sin\delta_1 = x'_{s_1} = (0{,}5+0{,}1) = 0{,}6 \Rightarrow \delta_1 = 36{,}87° \quad \varphi_1 = 18°{,}435$

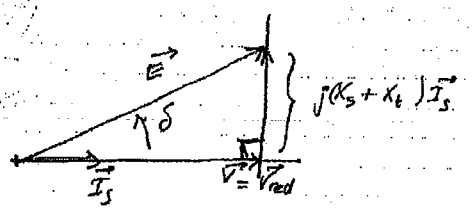
$\sin\delta_2 = x'_{s_2} = (0{,}5+0{,}3) = 0{,}8 \Rightarrow \delta_2 = 53{,}13° \quad \varphi_2 = 26°{,}565$

$(x'_{s_1} i_{s_1})^2 = \sigma_1^2 + e_1^2 - 2\sigma_1 e_1 \cos\delta_1 \Rightarrow i_1$, idem para grupo 2

$$i_1^2 = \frac{1^2+1^2-2\cos 36{,}87}{0{,}6^2} = 1{,}11 \Rightarrow \boxed{i_1 = 1{,}054 \text{ pu.}}$$

$$i_2^2 = \frac{1^2+1^2-2\cos 53{,}13}{0{,}8^2} = 1{,}25 \Rightarrow \boxed{i_2 = 1{,}118 \text{ p.u.}}$$

2) Para minimizar la corriente de línea, a $P = cte = 1$ pu, debe ser $\varphi = 0$ entre $\vec{V}_{red}$ e $\vec{I_s}$



$$P = 3 V_{red} I_s \underset{1}{\cos\varphi} = 3 V_s I_s$$

$$p = \frac{3 V_{red} I_s}{3 V_n I_n} = \underset{1}{\sigma} \cdot i = 1$$

$\Rightarrow \boxed{i_1 = i_2 = 1}$

$\Rightarrow e_1^2 = \sigma_1^2 + (x'_{s_1} i_1)^2 \Rightarrow \boxed{e_1 = 1{,}1662 \text{ p.u.}}$

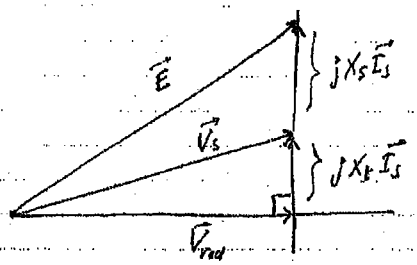
$e_2^2 = \sigma_2^2 + (x'_{s_2} i_2)^2 \Rightarrow \boxed{e_2 = 1{,}2806 \text{ p.u}}$

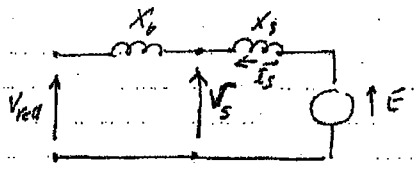
FACULTAD DE INGENIERIA Depto. De Documentación y Biblioteca Montevideo-Uruguay

INSTITUTO DE INGENIERIA ELECTRICA - Departamento de POTENCIA
Curso de Máquinas Eléctricas (5602) – Examen Diciembre 2013 – 9 de Diciembre 2013.

②

3)





$$V_{s_1}^2 = V_{red}^2 + (X_t I_s)^2$$

$$v_{s_1}^2 = \underset{1}{v_{red}^2} + (\underset{1}{x_{t_1} i_{s_1}})^2 = 1 + (0{,}1)^2 = 1{,}01 \Rightarrow \boxed{v_{s_1} = 1{,}005}$$

$$v_{s_2}^2 = v_{red}^2 + (x_{t_2} i_{s_2})^2 = 1 + (0{,}3)^2 = 1{,}09 \Rightarrow \boxed{v_{s_2} = 1{,}044}$$

$$P = 3 V_1 I_1 \cos\varphi_1$$

$$\underset{1}{p\,(p.u)} = \frac{3 V_1 I_1 \cos\varphi_1}{3 V_n I_n} = \underset{1{,}005}{v_1}\,\underset{1}{i_1} \cos\varphi_1 \Rightarrow \boxed{\cos\varphi_1 = \frac{1}{1{,}005} = 0{,}9950}$$

$$\varphi_1 = 5°{,}71$$

$$\Rightarrow \boxed{\cos\varphi_2 = \frac{1}{1{,}044} = 0{,}9578}$$

$$\varphi_2 = 16°{,}70$$

FACULTAD DE INGENIERIA
Depto. De Documentación y Biblioteca
Montevideo - Uruguay

A

14/16

INSTITUTO DE INGENIERIA ELECTRICA - Departamento de POTENCIA
Curso de Máquinas Eléctricas (5602) – Examen Diciembre 2013 – 9 de Diciembre 2013.

Pregunta 2

(1)

Pregunta 2

$$\begin{bmatrix}\psi_1\\ \psi_2\end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_1 & M\cos\theta \\ M\cos\theta & L_2\end{bmatrix}\begin{bmatrix} i_1\\ i_2\end{bmatrix} \qquad [\psi] = [\mathcal{L}(\theta)][i]$$

Régimen Lineal:

$$\Gamma = \frac{1}{2}[i]^t\left[\frac{\partial \mathcal{L}}{\partial\theta}\right][i] \quad \text{(resultado general para sist. lineales)}$$

$$\Gamma = \frac{1}{2}\begin{bmatrix} i_1 & i_2\end{bmatrix}\frac{d}{d\theta}\left(\begin{bmatrix} L_1 & M\cos\theta \\ M\cos\theta & L_2\end{bmatrix}\right)\begin{bmatrix} i_1\\ i_2\end{bmatrix} =$$

$$\Gamma = -\frac{1}{2}\begin{bmatrix} i_1 & i_2\end{bmatrix}\begin{bmatrix} 0 & M\sin\theta \\ M\sin\theta & 0\end{bmatrix}\begin{bmatrix} i_1\\ i_2\end{bmatrix} = -\frac{1}{2}\begin{bmatrix} i_1 & i_2\end{bmatrix}\begin{bmatrix} M i_2\sin\theta \\ M i_1\sin\theta\end{bmatrix}$$

a) $\boxed{\Gamma = -M\, i_1 i_2 \sin\theta}$

b) $i_1 = cte = I_{10}$

$\theta = \theta(t) = \Omega t + \theta_0$

$i_2(t) = \sqrt{2}\, I_2 \cos(\omega t - \varphi)$

$$\Gamma = -M I_{10}\sqrt{2} I_2 \sin(-\Omega t + \theta_0)\cos(\omega t - \varphi)$$

$$\sin a \cos b = \frac{1}{2}\left[\sin(a+b) + \sin(a-b)\right]$$

$$\Gamma = -M I_{10}\sqrt{2} I_2 \frac{1}{2}\left\{\sin[\underbrace{(-\Omega+\omega)}_{>0 \text{ siempre}} t + (\theta_0 - \varphi)] + \sin[\underbrace{(\Omega-\omega)}_{\geq 0\ ?} t + (\theta_0 + \varphi)]\right\}$$

Para que $\Gamma_m = \frac{1}{T}\int_0^T \Gamma(t)\,dt \neq 0 \Rightarrow \boxed{\Omega = \omega}$ (coincide con la "condición de frecuencia")

$$\boxed{\Gamma_m = -\frac{\sqrt{2}}{2} M I_{10} I_2 \sin(\theta_0 + \varphi)}$$

c) Bobina 1 en cortocircuito:

$v_1 = r_1 i_1 + \frac{d\psi_1}{dt}$, si $r_1 = 0$, y $v_1 = 0 \Rightarrow \frac{d\psi_1}{dt} = 0$

como debe ser en alterna: $\Rightarrow \omega\vec{\psi}_1 = 0$

$\Rightarrow \psi_1 = 0$

$$0 = L_1 i_1 + M\cos\theta\, i_2$$

$$\psi_2 = M\cos\theta\, i_1 + L_2 i_2$$

$$i_1 = -\frac{M}{L_1}\cos\theta\, i_2 \Rightarrow \psi_2 = M\cos\theta\left(-\frac{M}{L_1}\cos\theta\, i_2\right) + L_2 i_2$$

$$\psi_2 = \underbrace{L_2\left[1 - \frac{M^2}{L_1 L_2}\cos^2\theta\right]}_{L_2(\theta)} i_2$$

$$\boxed{\Gamma = \frac{1}{2}\frac{\partial L_2}{\partial\theta} i_2^2}$$

FACULTAD DE INGENIERIA
Depto. De Documentación y Biblioteca
Montevideo-Uruguay

15/16

17

INSTITUTO DE INGENIERIA ELECTRICA - Departamento de POTENCIA
Curso de Máquinas Eléctricas (5602) – Examen Diciembre 2013 – 9 de Diciembre 2013.

(2)

$$\Gamma = \frac{1}{2} L_2 \left[-\frac{M^2}{L_1 L_2} \cdot 2\cos\theta(-\sin\theta) \right] i_2^2$$

$$\Gamma = \frac{M^2}{L_1} \underbrace{\sin\theta\cos\theta}_{\frac{1}{2}\sin 2\theta} \, i_2^2 \qquad \left(\sqrt{2}\, I_2 \cos(\omega t - \varphi)\right)^2$$

$$\Gamma = \frac{M^2 I_2^2}{L_1} \sin 2\theta \underbrace{\cos^2(\omega t - \varphi)}_{\frac{1+\cos 2(\omega t-\varphi)}{2}}$$

$$\boxed{\Gamma = \frac{1}{2} \frac{M^2 I_2^2}{L_1} \sin 2(\Omega t + \theta_0)\left[1 + \cos 2(\omega t - \varphi)\right]}$$

$$\Gamma = \frac{1}{2} \frac{M^2 I_2^2}{L_1} \left\{ \sin 2(\Omega t + \theta_0) + \underbrace{\sin 2(\Omega t + \theta_0)\cos 2(\omega t - \varphi)}_{\frac{1}{2}\left[\sin[2(\underbrace{\Omega+\omega}_{>0})t + 2(\theta_0 - \varphi)] + \sin[2(\underbrace{\Omega-\omega}_{\gtrless 0})t + 2(\theta_0 + \varphi)]\right]} \right\}$$

$$\Gamma_m = \frac{1}{T}\int_0^T \Gamma(t)\,dt \neq 0 \quad \text{sólo si } \boxed{\Omega = \omega}$$, también coincidente con la "condición de frecuencia o de sincronismo)

Obs. conceptual: Este funcionamiento es similar al de una máquina de inducción "monofásica" (En este caso ideal tanto monofásicos estator y rotor, ~~es~~ no como en las máquinas monofásicas de inducción, que sólo tienen monofásico el estator.).
Pero la condición de rotor con resistencia = 0 impone que el rotor no puede tener pérdidas, y por lo tanto el único funcionamiento posible es en el modo sincrónico $\omega = \Omega$.

FACULTAD DE INGENIERIA
Depto. De Documentación y Biblioteca
Montevideo - Uruguay

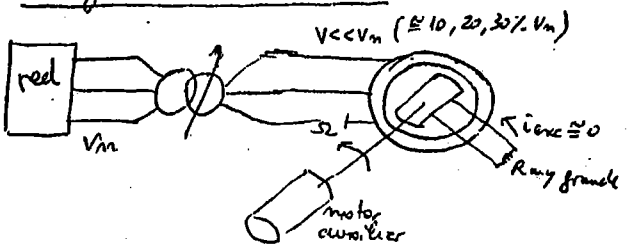
17 16/161

INSTITUTO DE INGENIERIA ELECTRICA - Departamento de POTENCIA
Curso de Máquinas Eléctricas (5602) – Examen Diciembre 2013 – 9 de Diciembre 2013.

Pregunta 3

Det. de xd y xq.

Ensayo de deslizamiento



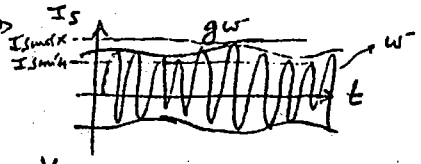
$\Omega' < \Omega_s$ pero $\Omega' \cong \Omega_s$

$g = \frac{\Omega_s - \Omega'}{\Omega_s} \leq 1\%$.

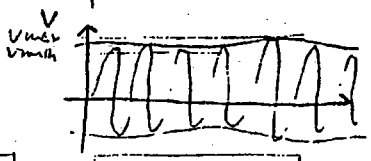
Se conecta a tensión reducida. Se hace girar a $\Omega' \neq \Omega_s$ pero $\cong$

Trato de que $\vec{I}_{rotor} = 0$, aunque no dejo los bornes abiertos, coloco R muy grande $\Rightarrow i_{exc} \cong 0$. Esto es xq' ∃ riesgos de q' haya sobretensiones en devanado rotor (inductancia q' ve un campo variable, y no gira a Ω_s) $\Rightarrow$ proveer camino para una I.

Voy girando, con $\Omega' \neq \Omega_s \Rightarrow$ a veces se ve xd y luego xq; pero $x_d > x_q \Rightarrow$



→ aparece Is modulada (Is < cuando se ve xd q'es >, y > con xq)



→ V tb. aparece modulada, aunque menos

Luego $\boxed{x_q = \frac{V_{mín}}{I_{smáx}}}$; $\boxed{x_d = \frac{V_{máx}}{I_{smín}}}$

Si este ensayo se hace a bs ms de rotor liso, tb. encuentro $x_d \neq x_q$. Esto es xq' tengo ranurado:

$\frac{x_q}{x_d} =$ → polos salientes $\simeq 0{,}5$ a $0{,}8$
→ polos lisos $\simeq 0{,}9$ a $0{,}95$

En rigor, todas las máq. tienen efectos de polos salientes.

Xq = Vmín/Ismáx
Xd = Vmáx/Ismín

FACULTAD DE INGENIERIA
Depto. De Documentación y Biblioteca
Montevideo - Uruguay