Maquinas Eléctricas. **15 de julio de 2016**

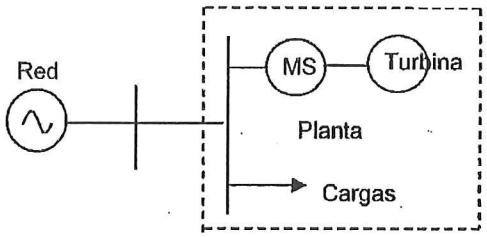
Problema No. 1

Dos alternadores trifásicos iguales, conectados en estrella, cada uno de 850 kVA, 2200 V, están rígidamente acoplados al mismo motor. Los alternadores son de 64 polos, y tienen una reactancia sincrónica de 2.12 Ω por fase, considerándose despreciable su resistencia. Sus estatores están eléctricamente acoplados en paralelo, suministrando el conjunto 1400 kW con factor de potencia 0.87 inductivo y bajo la tensión nominal de 2200 V.
El sistema de excitación es único para las dos máquinas, y se conectan los rotores en serie, trabajando entonces ambos con la misma corriente de excitación.
Los estatores de los alternadores están perfectamente alineados pero debido a la imprecisión del montaje mecánico los rotores resultaron montados con un desplazamiento angular mecánico o geométrico de 30' (minutos de grado) uno respecto del otro.

Se pide:
1) Indicar el ángulo eléctrico o ángulo de fase con que deben resultar desfasados entre sí los fasores asociados a las tensiones internas de ambos alternadores. Se debe realizar un diagrama fasorial donde se representen las tensiones inducidas de ambas máquinas en la situación en que ambas máquinas aportan activa y reactiva a la red.
2) Determinar el módulo de las tensiones internas E en el funcionamiento bajo carga descripto.
3) Calcular la potencia suministrada por cada máquina y la respectiva corriente de línea en esas condiciones.

Nota: En todo el problema se supone que los alternadores trabajan en régimen lineal. A pesar de que en realidad se trata de máquinas de polos salientes, se admitirá que el modelo de Behn-Eschemburg representa adecuadamente el funcionamiento de las mismas, con el valor de reactancia sincrónica indicado.

Problema No. 2



En una planta industrial se tiene autoproducción de energía eléctrica, mediante una turbina de vapor, con vapor generado en el propio proceso de la planta. La potencia mecánica entregada en el eje de la turbina se puede regular a voluntad entre 0 y 100 kW, la cual se emplea como motor primario de una máquina sincrónica MS empleada como alternador, cuyos datos se indica más abajo. El objetivo es tener total autoproducción del consumo eléctrico de la planta, cuyas carga total suma 84 kW con cos φ = 0.7 inductivo, de forma tal que, aunque la planta se mantiene siempre conectada a la red de 6 kV (entre fases, supuesta de potencia infinita) se busca que la corriente intercambiada con la red sea nula.

Datos Alternador: Valores nominales 125 kVA, 6 kV (entre fases) conexión en estrella, 50 Hz
Rotor cilíndrico de 2 polos

Ensayos a frecuencia nominal:

a) ensayo en vacío:

iexc (A)	0	2	4	6	8	10	12	15.6
Uo (kV)	0	2.2	4.4	6.0	6.88	7.49	7.82	8.25

b) Ensayo en devatado bajo tensión nominal: iexc = 11.33 A, Id = 12 A
c) Ensayo en cortocircuito: iexc = 3 A, Icc= 9 A

Se pide:
1) (18/25) Determinar la potencia mecánica en el eje de la turbina y la corriente de excitación del alternador, para lograr el objetivo de tener corriente nula con la red.
2) (7/25) Si con la MS girando a la velocidad de sincronismo se desconectara la turbina y luego se cortara la corriente de excitación del alternador, pero dejando MS conectada por sus bornes a la red de 6 kV, ¿cuál sería el valor de la corriente consumida de la red por el conjunto de la planta?

Notas: Para la pregunta 1) se aplicará el método de Potier. La pregunta 2) se resolverá por el método aproximado de la reactancia sincrónica variable Xs(iexc). En todos los cálculos se supondrá despreciable la resistencia de estator del alternador, así como todas las pérdidas.

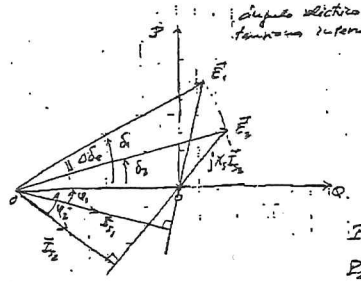
Prob. 1)

P2 - Solución propuesta: ①

$\theta_e = p\,\theta_m$

1) 64 polos $\Rightarrow p = 32 \Rightarrow \boxed{\Delta\delta_e = p \cdot 30' = p \cdot 0{,}5 \Rightarrow 16°}$

ángulo eléctrico con que están desfasadas las tensiones internas $\vec{E}$ de ambos alternadores.



$|\vec{E}_1| = |\vec{E}_2| = E$

$P_1 = \frac{3V_s E}{X_s} \sin\delta_1$

$P_2 = \frac{3V_s E}{X_s} \sin\delta_2$

$\delta_1 = \delta_2 + \Delta\delta_e$

$P = P_1 + P_2 = 1400\ kW$

$P = \frac{3V_s E}{X_s}\left[\sin(\delta_2 + \Delta\delta_e) + \sin\delta_2\right]$ ①

$Q = P\,tg\,\varphi = 1400 \cdot tg(\text{Arcos } 0{,}87) = 793{,}4\ kVAr$

$Q = \frac{3V_s E}{X_s}\left\{\left[E\cos(\delta_2 + \Delta\delta_e) - V_s\right] + \left[E\cos(\delta_2) - V_s\right]\right\}$

$Q = \frac{3V_s E}{X_s}\left[E(\cos(\delta_2 + \Delta\delta_e) + \cos\delta_2) - 2V_s\right]$ ②

① ⇒ ③ $\quad p = \frac{P \cdot X_s}{3V_s} = E\left[\sin(\delta_2 + \Delta\delta_e) + \sin\delta_2\right]$

② ⇒ ④ $\quad q = \frac{Q X_s}{3V_s} = E\left[\cos(\delta_2 + \Delta\delta_e) + \cos\delta_2\right] - 2V_s$

incógnitas δ_2; E

③ y ④ ⇒ ⑤: $\boxed{\frac{q + 2V_s}{p} = \frac{\cos(\delta_2 + \Delta\delta_e) + \cos\delta_2}{\sin(\delta_2 + \Delta\delta_e) + \sin\delta_2}}$

$\frac{q + 2V_s}{p} = \frac{441{,}4 + 2 \cdot \frac{2200}{\sqrt{3}}}{778{,}9} = 3{,}828$

$p = \frac{P X_s}{3V_s} = 778{,}9\ V$

$q = \frac{Q X_s}{3V_s} = 441{,}4\ V$

②

③: $\boxed{\frac{\cos(\delta_2 + \Delta\delta_e) + \cos\delta_2}{\sin(\delta_2 + \Delta\delta_e) + \sin\delta_2} = 3{,}828}$

A

Solución aproximada por tanteo:

$\delta_2 = 45° \Rightarrow A = 0{,}95$

$\delta_2 = 15° \Rightarrow A = 2{,}35$

$\delta_2 = 5° \Rightarrow A = 4{,}33$

$\delta_2 = 10° \Rightarrow A = 2{,}70$

$\delta_2 = 7° \Rightarrow A = 3{,}73$

$\delta_2 = 6° \Rightarrow A = 4{,}011$

$\delta_2 = 6{,}5° \Rightarrow A = 3{,}86 \Rightarrow \boxed{\delta_2 = 6{,}7° \Rightarrow A = 3{,}812}$

$\Rightarrow \boxed{\delta_1 = 22{,}7°}$

$\boxed{E = \frac{P}{\sin(22{,}7°) + \sin 6{,}7°} = 1548{,}9\ V}$

2). $\boxed{P_1 = \frac{3V_s E}{X_s}\sin\delta_1 = 1074{,}99\ kW \approx 1075\ kW}$

$\boxed{P_2 = \frac{3V_s E}{X_s}\sin\delta_2 = 325{,}00\ kW}$

$P_1 + P_2 = 1400\ kW$ ✓

$Q_1 = \frac{3V_s E}{X_s}\left[E\cos\delta_1 - V_s\right] = 286{,}8\ kVAr$

$Q_2 = \frac{3V_s E}{X_s}\left[E\cos\delta_2 - V_s\right] = 483{,}6\ kVAr$

$Q_1 + Q_2 = 770{,}4\ kVAr$

$tg\,\varphi = 0{,}5503 \Rightarrow \cos\varphi = 0{,}876$

$tg\,\varphi_1 = \frac{Q_1}{P_1} = \frac{286{,}8}{1075} = 0{,}2668 \Rightarrow \varphi_1 = 14{,}94°$

$tg\,\varphi_2 = \frac{Q_2}{P_2} = \frac{483{,}6}{325} = 1{,}488 \Rightarrow \varphi_2 = 56{,}10°$

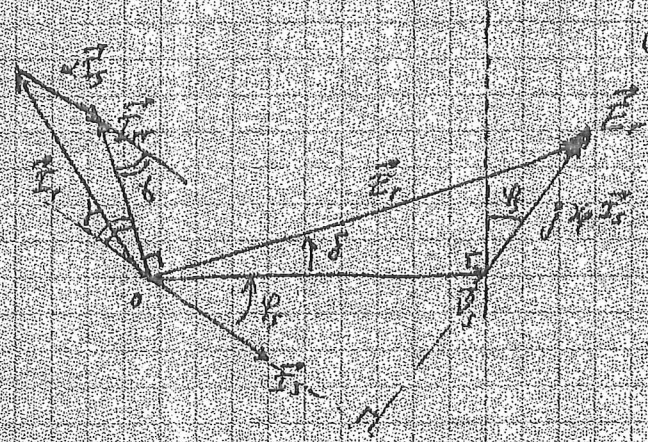
$\boxed{I_1 = \frac{P_1}{3V_s\cos\varphi_1} = 292{,}0\ A \qquad I_2 = \frac{P_2}{3V_s\cos\varphi_2} = 152{,}9\ A}$

2/4

Problema 2. Solución Propuesta. (1)

1) Método de Potier. En anexo 2 determinaron gráficamente α y X_p

$$\boxed{\begin{array}{l}\alpha = 0{,}254 \\ X_p = 48{,}11\ \Omega\end{array}}$$



① $\boxed{E_r^2 = V_s^2 + X_p^2 I_s^2 - 2 V_s X_p I_s \underbrace{\cos\left(\frac{\pi}{2} + \varphi_s\right)}_{-\sin(\varphi_s)}}$

$$\gamma + \frac{\pi}{2} + (\varphi_s + \delta) = \pi$$

$$\Rightarrow \boxed{\gamma = \frac{\pi}{2} - (\varphi_s + \delta)}$$

$$I_r^2 = I_{rr}^2 + (\alpha I_s)^2 - 2 I_{rr} \cdot \alpha I_s \underbrace{\cos(\pi - \gamma)}_{= \underbrace{\cos\left(\frac{\pi}{2} + (\varphi_s + \delta)\right)}_{= -\sin(\varphi_s + \delta)}}$$

② $\boxed{I_r^2 = I_{rr}^2 + \alpha^2 I_s^2 + 2 \alpha I_s I_{rr} \sin(\varphi_s + \delta)}$

$\boxed{P = 84\ kW = P_{mecánica\ de\ la\ Turbina}}$

$i_{exc}^{?} = ?$ Carga: $P = 84\ kW$ $\cos\varphi_s = 0{,}7$ inductivo $\Rightarrow$ MS sobreexcitada

$$\Rightarrow \varphi_s = \text{Arcos}(0{,}7) = 45°{,}5730$$

$$S = \frac{P}{\cos\varphi} = \frac{84\ kW}{0{,}7} = 120\ kVA \Rightarrow I_s = \frac{120\ kVA}{\sqrt{3}\ 6\ kV}$$

$$\boxed{\vec{I}_s = 11{,}547\ A \angle \varphi = -45°{,}5730}$$

① $\Rightarrow$ $E_r^2 = \left(\frac{6000}{\sqrt{3}}\right)^2 + (48{,}11 \cdot 11{,}547)^2 + 2\,\frac{6000}{\sqrt{3}} \cdot 48{,}11 \cdot 11{,}547 \sin(45°{,}5730)$

$E_r = 3880{,}4\ V \Rightarrow \sqrt{3}\, E_r = 6720{,}9\ V \Rightarrow \boxed{I_{rr} = 7{,}638\ A}$

$$I_{rr} = 6 + \frac{8-6}{6{,}88-6}(6{,}7209 - 6) = 7{,}638\ A$$

$$\sin\delta = \frac{X_p I_s \cos\varphi_s}{E_r} = \frac{48{,}11 \cdot 11{,}547 \cdot 0{,}7}{3880{,}4} \Rightarrow \boxed{\delta = 5°{,}752}$$

② $\Rightarrow$ $i_{exc}^2 = I_r^2 = (0{,}254 \cdot 11{,}547)^2 + 7{,}638^2 + 2 \cdot 0{,}254 \cdot 11{,}547 \cdot 7{,}638 \sin(45°{,}5730 + 5°{,}752)$

$\boxed{i_{exc} = I_r = 10{,}096\ A} \simeq \boxed{i_{exc} = 10{,}1\ A}$

2) Método de $X_s(i_{exc})$ $\qquad i_{exc_{cc}} = 3A \Rightarrow I_{s_{cc}} = 2A \Rightarrow I_{a_{cc}} = 3\, i_{exc_{cc}}$

i_{exc} (A)	0	2	4	6	8	10	12	15,
U_0 (entre fases) kV	0	2,2	4,4	6,60	6,38	7,14	7,52	8,25
I_{s_a} (A)	0	6	12	18	24	30	36	46,3
$X_s = \frac{U_0}{\sqrt{3}\, I_{s_a}}$ (Ω)	(211,7)	211,7	211,7	212,2	165,5	144,1	125,8	103,0

Extrapolando en la zona $X_s = cte$.

Si $i_{exc} = 0 \Rightarrow \boxed{X_s(0) = 211,7\ \Omega}$

$$I_s = \frac{V_s}{X_s} = \frac{6000\ V}{\sqrt{3}\ 211,7\ \Omega} = 16,363\ A.$$

$\Rightarrow E = 0$

Balance Eléctrico:

$$\vec{V}_s + j X_s \vec{I}_s = \vec{E} = 0$$

$$\Rightarrow \boxed{\vec{I}_s = 16,363\ A \angle 90^\circ}$$

el -90° según el esquema

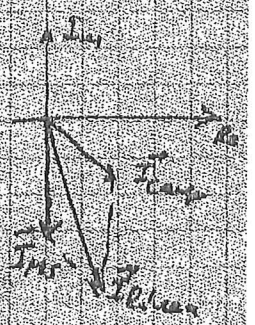
$$\vec{I}_{carga} = 11,5470\ A \angle -45,5730$$

Se debe tomar: $\boxed{\vec{I}_{MS} = 16,363\ A \angle -90^\circ}$ porque tanto las cargas como MS consumen reactiva en sus bornes (MS subexcitada!)

Conv. signos receptor

$$\vec{I}_{línea} = \vec{I}_{carga} + \vec{I}_{MS}$$

dentro en conv. signos receptor



$$\vec{I}_{línea} = (8,0829 - j\,8,2462) - j\,16,363\ A$$

$$= 8,0829 - j\,24,6095$$

$$\boxed{\vec{I}_{línea} = 25,90\ A \angle -71,8114}$$