INSTITUTO DE INGENIERIA ELECTRICA - Departamento de POTENCIA
Parcial N°2 de: MAQUINAS ELECTRICAS (5602) (P. 1997)

25 de Noviembre de 2014

Preguntas de Teórico – total 50% del parcial: 1): 25% - 2): 25% - 3): 15%

1) Máquina Sincrónica de polos salientes en régimen lineal. P = f(E, δ) (25%)
A partir de la expresión general de la tensión en bornes de una MS de polos salientes en régimen permanente sinusoidal:

$$\vec{V}_s + R_s \vec{I}_s = -j\omega \vec{\psi}_s \quad \text{con} \quad \vec{\psi}_s = \vec{\psi}_d + \vec{\psi}_q \quad \text{y} \quad \vec{\psi}_d = M_{rs} \vec{I}_r + L_d \vec{I}_d$$

$$\vec{\psi}_q = L_q \vec{I}_q$$

Se pide deducir la expresión de la potencia activa **P = función (E , δ)** , suponiendo conocidos los parámetros de MS : R_s (se admitirá $R_s \approx 0$), $X_d = \omega L_d$, $X_q = \omega L_q$ y el régimen de funcionamiento: *V*s constante, frecuencia constante, e *I*s dato (módulo y fase).

Notación: $E = \omega M_{rs} |\vec{I}_r|$, y δ = ángulo interno de la máquina, entre $\vec{V}_s$ y $-j\omega M_{rs} \vec{I}_r$

2) Máquina Sincrónica de polos salientes en régimen lineal. (25%)
Indicar, en el plano P,Q, el lugar geométrico de los puntos correspondientes a corriente de excitación nula, justificándolo. Explicar por qué, aun con excitación nula, es posible tener potencia activa no nula (ver resultado de la pregunta 1)). Se supondrá la MS de polos salientes conectada a una red de potencia infinita, de tensión y frecuencia nominales, resistencia de estator nula, y conocidas las reactancias Xd y Xq.

3) Pregunta opcional: Máquina Sincrónica de polos salientes en régimen lineal. Ensayo de deslizamiento. (+15%)
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.

INSTITUTO DE INGENIERIA ELECTRICA - Departamento de POTENCIA
Parcial N°2 de: MAQUINAS ELECTRICAS (5602) (P. 1997)

25 de Noviembre de 2014

Problema N°1 (25% del parcial)

Se tiene un motor sincrónico, trifásico en estrella, de valores nominales según chapa: 10 kVA, 220 V por fase, 50 Hz, cosφ=1. Su rotor porta el bobinado inductor y es cilíndrico. Su reactancia sincrónica vale 0.7 p.u.. Tanto los efectos de la saturación como las pérdidas de la máquina se considerarán despreciables.

El motor está alimentado a partir de una red 220/380 V, 50 Hz, y acciona una carga de par resistente constante, independiente de la velocidad, cuya potencia consumida es igual a la potencia nominal del motor. La corriente de excitación se encuentra ajustada a un valor tal que en esas condiciones minimiza la corriente de línea. A este valor se le denomina corriente de excitación nominal.

Se pide:

a) Calcular la potencia consumida y la corriente de línea en régimen permanente si la tensión de alimentación sufre una reducción de 10%, sin modificar el ajuste de la corriente de excitación.
b) Calcular cómo debería reajustarse la corriente de excitación, en proporción a la corriente de excitación nominal, para minimizar la corriente de línea cuando se produce una reducción de la tensión de alimentación de 10% como en 1), a frecuencia constante e igual a la nominal.
c) Determinar cuánto debería reducirse la tensión de alimentación, con frecuencia y corriente de excitación constantes e iguales a sus valores nominales, para que se alcance el límite de estabilidad estática en el funcionamiento en régimen permanente del motor considerado. Indicar en qué sentido debería modificarse la corriente de excitación, ante una reducción de la tensión de alimentación, para reducir el riesgo de inestabilidad.

Problema N°2 (25% del parcial)

Se tiene un motor de inducción (MI) y una máquina sincrónica (MS) conectados a una barra A la cual es alimentada desde la red por un transformador (T). Para la operación del MI se requiere que cuando está cargado con un par de 460Nm debe rotar a 1485 rpm. Tanto MI, MS y el secundario de T son de 440V nominales, pero la red que alimenta el primario es de una tensión menor a la nominal de T. MS opera como compensador sincrónico.

Se pide:

1. Determinar la tensión a la que deberá estar la barra A para que el MI opere en las condiciones solicitadas.
2. En las condiciones de la parte anterior calcular: la corriente que toma el MI, la corriente que debe entregar la MS y la corriente entregada por la red.
3. Determinar la corriente de excitación necesaria para que la MS opere en el punto calculado en la parte anterior.

Datos:

red: 5.7kV, 50Hz, potencia infinita
T: 6.3/0,44kV, 75kVA, 50Hz, zcc=5%
MI: 440V, 50Hz, 1480rpm, representado por su modelo de pequeño deslizamiento: R2e=25 mΩ (modelo estrella equivalente).
MS: 440V, 100kVA, 50Hz, conexión estrella, reactancia de Potier = 0.1 pu, resistencia de estator despreciable.

Ensayo de vacío a 50 Hz (tensión medida entre fases):

i(A)	0	2,7	4,4	5,8	7,8	9,5	13,5	22,0
E(V)	0	145,5	236,9	291,1	355,4	406,2	440,0	490,8

Ensayo de cortocircuito: corriente de línea nominal para 14 A de corriente de campo.

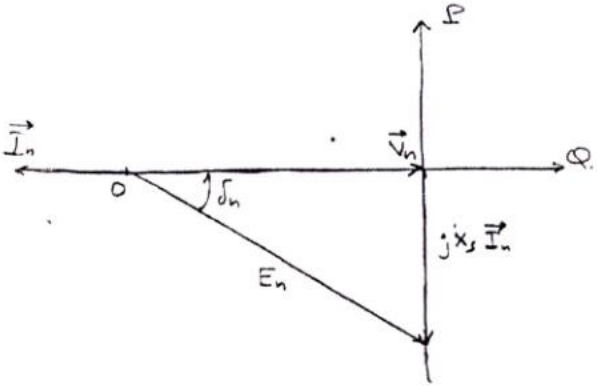
Máquinas Eléctricas – Solución 2º parcial 2014

P1) a) $V_1 = 0{,}9\,V_n$

$$\begin{cases} i_f = cte \\ f = cte \quad (n = cte,\ ó\ \Omega = cte) \\ C_r = cte \\ \text{Pérdidas de MS = despreciables.} \end{cases} \Rightarrow P = cte.$$

Ajuste de i_f: Si $P = P_n$, $V = V_n \Rightarrow I = I_{min} \Rightarrow \begin{cases} I = I_n \\ \cos\varphi_n = 1 \end{cases}$

λ_n: $V = V_n$:



Definimos como E_n (e i_{f_n}) a la tensión y ajuste de excitación correspondientes.

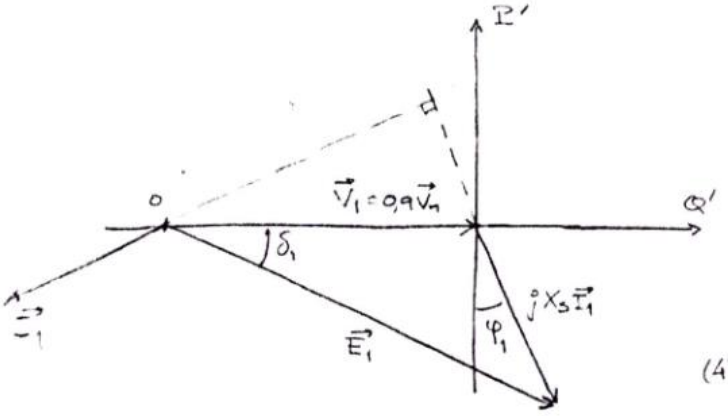
(1) $E_n^2 = V_n^2 + X_s^2 I_n^2$

(2) $P_n = 3\,\dfrac{V_n E_n}{X_s}\sin\delta_n$

(3) $P_n = \sqrt{3}\,U_n I_n \underbrace{\cos\varphi_n}_{1} = 3 V_n I_n$

(2) y (3) $\Rightarrow$ $\boxed{\sin\delta_n = \dfrac{X_s I_n}{E_n}}$

Reducción de V: $\boxed{V_1 = 0{,}9\,V_n \quad e \quad i_f = cte}$



P', Q': Cambian las escalas de los ejes.

$|\vec{E}_1| = E_n$.

$\left.\begin{matrix} f = cte \\ C_r = cte \end{matrix}\right\}$ $\boxed{P_r = P_n = cte.}$ (3)

(4) $3\,\dfrac{V_n E_n}{X_s}\sin\delta_n = 3\cdot\dfrac{0{,}9 V_n E_n}{X_s}\sin\delta_1$

(4)' $\boxed{\sin\delta_n = 0{,}9\sin\delta_1}$

(5) $3 V_n I_n = 3\cdot 0{,}9\,V_n I_1 \cos\varphi_1 \Rightarrow$ (5)' $\boxed{I_n = 0{,}9\,I_1\cos\varphi_1}$

(6) $(X_s I_1)^2 = (0{,}9\,V_n)^2 + E_n^2 - 2\cdot(0{,}9\,V_n)\,E_n\cos\delta_1$

(6)' $\boxed{X_s^2 I_1^2 = 0.81\,V_n^2 + E_n^2 - 1.8\,V_n E_n\sqrt{1 - \left(\dfrac{X_s I_n}{0.9\,E_n}\right)^2}}$

Aplicación numérica:

$$P_n = 10 \text{ kW}$$

$$I_n = \frac{10 \text{ kW}}{3 \cdot 220 \text{ V}} = 15{,}15 \text{ A}$$

$$X_s = 0.7 \cdot \frac{V_n}{I_n} = 0.7 \cdot \frac{220 \text{ V}}{15.15 \text{ A}} = 10.165 \ \Omega$$

$$X_s I_n = 0.7 \ V_n = 0.7 \ 220 = 154 \text{ V}$$

$$E_n = \sqrt{220^2 + 154^2} = 268{,}54 \text{ V}$$

$$\sin \delta_n = \frac{154 \text{ V}}{268{,}54 \text{ V}} = 0{,}5735 \Rightarrow \delta_n = 34°{,}99 \simeq 35°$$

$$\sin \delta_1 = \frac{\sin \delta_n}{0.9} = 0{,}6372 \Rightarrow \delta_1 = 39°{,}58 \Rightarrow \cos \delta_1 = 0{,}7707$$

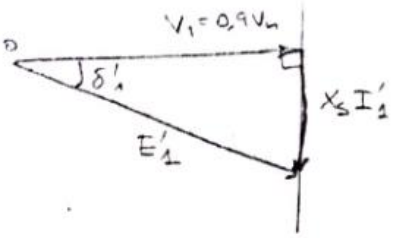
$$X_s^2 I_1^2 = 0.81 \cdot 220^2 + 268.54^2 - 1.8 \ 220 \cdot 268.54 \cdot 0{,}7707 = 29360.07$$

$$\boxed{I_1 = \frac{\sqrt{29360.07}}{10.165} = 16{,}857 \text{ A}} \quad \text{20.}$$

$$\boxed{I_1 = 1{,}11254 \ I_n} \Rightarrow \boxed{\cos \varphi_1 = \frac{1}{0.9} \cdot \frac{I_n}{I_1} = 0{,}9987}$$

$$\boxed{\varphi_1 = 2°{,}90}$$

b) Si se ajusta la excitación para minimizar la corriente de línea:



$$E'_1 = \sqrt{(0{,}9\, V_n)^2 + (X_s I'_1)^2}$$

con $I'_1 = I_1 \cos\varphi_n = 16.852 \cdot 0{,}9987$

$$I'_1 = 16.835 = 1{,}11111\ I_1$$

Obviamente: $P_n = 3 \cdot 0{,}9\, V_n\, I'_1 \underbrace{\cos\varphi'_1}_{=1}$

$$\Rightarrow I'_1 = \frac{1}{0{,}9} I_n \quad (1\,p)$$

$$E'_1 = \sqrt{(0{,}9\, V_n)^2 + \left(\frac{X_s I_n}{0{,}9}\right)^2} = \sqrt{(0{,}9 \cdot 220)^2 + \left(\frac{154}{0{,}9}\right)^2} = 261{,}69\ V.$$

$$\boxed{\frac{i'_f}{i_{fn}} = \frac{E'_1}{E_n} = \frac{261{,}69}{268{,}54} = 0{,}9745} \quad \text{ó} \quad \boxed{-2{,}55\,\%} \quad (1\,p)$$

por linealidad
(Saturación despreciable)

c) $V_x = x V_n$ con $0 < x < 1$

$f_x = cte = f_n$

$i_f = cte$

Para que se encuentre en el límite de estabilidad, en régimen permanente, debe ser:

$$\boxed{\sin\delta_x = 1 \quad , \text{ ó } \quad \delta_x = 90^\circ}$$

Por lo visto en 1) a) $\sin\delta_x = \frac{1}{x} \sin\delta_n \Rightarrow \boxed{x = \sin\delta_n}$

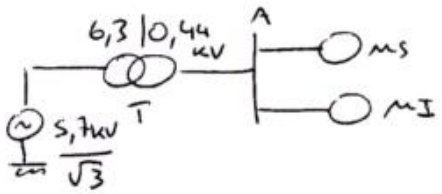
$$\boxed{x = \sin\delta_n = \frac{X_s I_n}{E_n} = 0{,}5735}$$

La tensión debería reducirse 42,65%. para que se alcance el límite de estabilidad en régimen permanente –

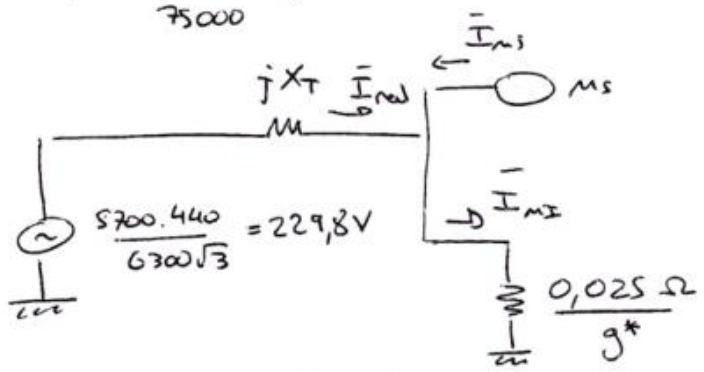
Para reducir el riesgo de inestabilidad se debería aumentar la corriente de excitación, para disminuir el ángulo δ inicial,

La reducción simultánea de tensión y frecuencia en la misma proporción no modifica el ángulo de par, y por lo tanto no aumenta el riesgo de inestabilidad. Es más riesgosa la reducción de tensión sola.

P2) a)



$$X_T = \frac{440^2}{75000} \cdot 0{,}05 = 129\,m\Omega$$

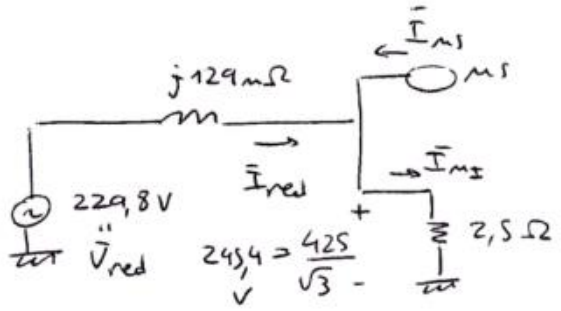


$$g^* = \frac{1500 - 1485}{1500} = 0{,}01$$

Por MI: $C = \dfrac{U^2 \cdot g^*}{\omega_s R_{2e}} = 460\,Nm \rightarrow U = 425\,V$

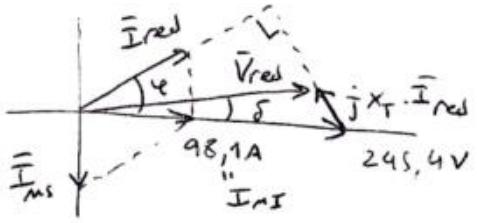
(modelo p. d.)

b)



$I_{MI} = 98{,}1\,A$

Ms opera como compensador síncrónico:



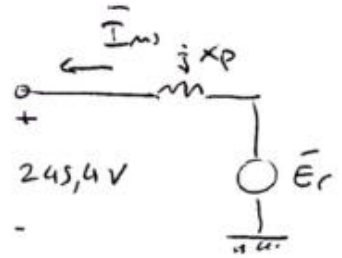
$I_{red} \cos\varphi = I_{MI} = 98{,}1\,A$

$I_{red} \cos\varphi \cdot X_T = V_{red} \cdot \operatorname{sen}\delta \rightarrow \delta = 3{,}16°$

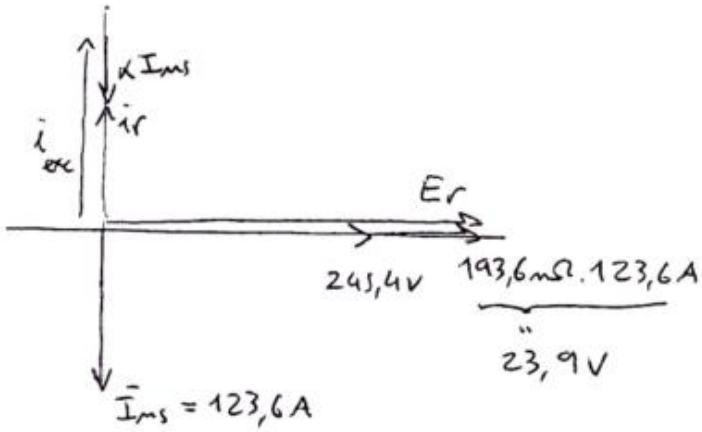
$\underbrace{245{,}4\,V - V_{red}\cos\delta}_{X_T} = I_{red} \operatorname{sen}\varphi = I_{Ms}$

$\rightarrow \bar{I}_{Ms} = 123{,}6\,A \angle -90° \rightarrow \bar{I}_{red} = \bar{I}_{MI} - \bar{I}_{Ms} = 157{,}8 \angle 51{,}6°\ A$

c)



$$X_p = 0{,}1 \cdot \frac{440^2}{100.000} = 193{,}6\ m\Omega$$



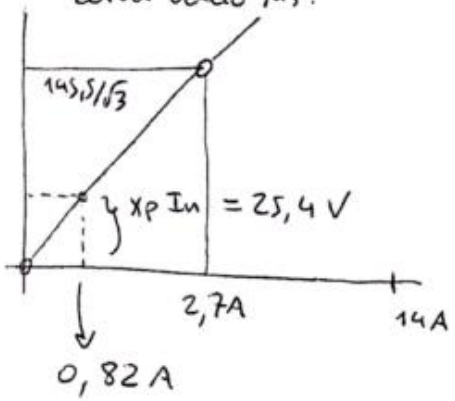
$E_r = 269{,}3\ V$

↓

curva vacío:

$i_r = 17{,}9\ A$

curva vacío ms:



$$I_n = \frac{100.000}{\sqrt{3}\,440} = 131{,}2\ A$$

em cc: @ I_n, $i_{exc} = 14\ A$

→ $14\ A - 0{,}82\ A = \alpha \cdot 131{,}2\ A$

↳ $\alpha = 0{,}1$

↳ $i_{exc} = i_r + 0{,}1 \cdot 123{,}6 = 30{,}3\ A$