INSTITUTO DE INGENIERIA ELECTRICA - Departamento de POTENCIA

Examen de: **MAQUINAS ELECTRICAS**
CONVERSION ELECTROMECANICA

52101420

27 de Julio 2001

Problema No. 1

Para mover una carga de par resistente constante, independiente de la velocidad, se conecta dos motores trifásicos de inducción M1 y M2, acoplados por sus ejes, y se los alimenta desde la misma red trifásica de 220 V, 50 Hz, supuesta de potencia infinita. El motor M1 es de buen rendimiento pero bajo par de arranque, y el M2 es de alto par de arranque en condiciones nominales (440 V, 60 Hz). Para no perder par de arranque se conecta su estator en Δ para alimentarlo desde la red de 220 V, 50 Hz.

El arranque se realiza con la carga conectada. Para el mismo se conecta la alimentación de los dos motores M1 y M2 al mismo tiempo, y cuando el grupo llega a su velocidad de régimen se desconecta la alimentación de M2.

Datos:

Carga: Consume 15 kW a 1480 rpm.

Motor M1: Valores nominales: 220 V, 50 Hz, estator Δ, rotor jaula, 4 polos.
Ensayo en vacío a 50 Hz: alimentado bajo tensión nominal, consume una corriente de 12.95 A y una potencia de 968 W.
Ensayo en cortocircuito a rotor bloqueado, a 50 Hz: bajo una tensión de 52 V, consumió una corriente de 50 A, con 225 W de pérdidas.
Resistencia 1 fase estator: 0.03 Ohm.
Se considerará que las pérdidas Joule en el ensayo en vacío son despreciables, y que se puede ignorar las pérdidas en el hierro y la corriente magnetizante en el ensayo realizado en cortocircuito a rotor bloqueado

Motor M2: Valores nominales: 440 V, 60 Hz, estator Y, rotor bobinado, en Y. 4 polos.
De los datos del fabricante se sabe que alimentado bajo tensión y frecuencia nominales:
- el par de arranque es de 200 Nm
- con el rotor abierto y detenido se tiene una tensión de 311 V entre anillos del rotor.

Se midió: Resistencia 1 fase estator: 0.03 Ohm, Resistencia 1 fase rotor: 0.60 Ohm.
Se considerará despreciable la corriente de vacío de M2 a los efectos de la resolución del problema.

Se pide:

1) Determinar el circuito equivalente del motor M1.

2) Mostrar que el motor M1 solo, sin alimentar M2, no es capaz de arrancar con la carga conectada.

3) En las condiciones de alimentación indicadas: 220 V, 50 Hz, estator en Δ, determinar el circuito equivalente de M2 y calcular su par de arranque. Mostrar que si se hubiese conectado en Y, el par de arranque del conjunto de los dos motores sería insuficiente para mover la carga.

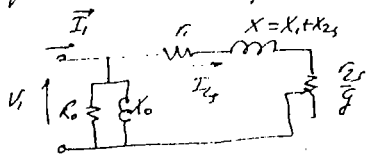
4) Calcular la velocidad de régimen que alcanza el grupo con los dos motores conectados, y la variación de velocidad que se produce al desconectar la alimentación de M2. Calcular la variación de corriente consumida por el conjunto al desconectar M2. Emplear una aproximación válida para pequeños deslizamientos.

Nº1. - Solución Propuesta. 17

2/6

1) Par de arranque de M1.

Previo: Circuito equivalente de M1. (en Lagar).



$V_1 = \frac{220}{\sqrt{3}}$ V

Ensayo en vacío a 50 Hz.

$U_{10} = 220$ V

$I_{10} = 12,95$ A

$P_{10} = 968$ W

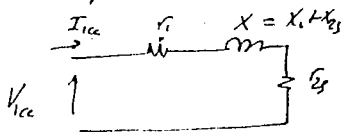
$$P_{10} = 3\frac{V_{10}^2}{R_0} = \frac{U_{10}^2}{R_0} \Rightarrow \boxed{R_0 = \frac{U_{10}^2}{P_{10}} = \frac{220^2}{968} = 50\ \Omega}$$

$$Q_{10} = 3\frac{V_{10}^2}{X_0} = \frac{U_{10}^2}{X_0} \Rightarrow X_0 = \frac{U_{10}^2}{\sqrt{3U_{10}^2 I_{10}^2 - P_{10}^2}}$$

$$\boxed{X_0 = \frac{220^2}{\sqrt{3 \cdot 220^2 \cdot 12,95^2 - 968^2}} = 10,0\ \Omega}$$

Ensayo en CC a r.b. (50 Hz).

Se desprecia rama //.



$U_{1cc} = 52$ V

$I_{1cc} = 50$ A

$P_{1cc} = 225$ W

$$P_{1cc} = 3(r_1 + r_{2s}) I_{1cc}^2$$

$$r_1 + r_{2s} = \frac{P_{1cc}}{3 I_{1cc}^2} = \frac{225\ W}{3 \cdot 50^2} = 0,03\ \Omega$$

$$r_1 = 0,01\ \Omega \text{ (dato)} \Rightarrow \boxed{r_{2s} = 0,02\ \Omega}$$

$$V_{1cc} = \sqrt{(r_1 + r_{2s})^2 + X^2}\, I_{1cc}$$

$$X = \sqrt{\frac{V_{1cc}^2}{I_{1cc}^2} - (r_1 + r_{2s})^2} = \sqrt{\frac{52^2}{3 \cdot 50^2} - 0,03^2} = 0,5997\ \Omega \simeq 0,60\ \Omega$$

Circuito equivalente M1:

$R_0 = 50\ \Omega$

$X_0 = 10\ \Omega$

$r_1 = 0,01\ \Omega$

$r_{2s} = 0,02\ \Omega$

$X = 0,60\ \Omega$

Par de arranque:

$$C_d = \left(\frac{U_1^2}{\Omega_s} \cdot \frac{\frac{r_{2s}}{g}}{\left(r_1 + \frac{r_{2s}}{g}\right)^2 + X^2} \right)\Bigg|_{g=1}$$

$$C_d = \frac{U_1^2}{\Omega_s} \cdot \frac{r_{2s}}{(r_1 + r_{2s})^2 + X^2} = \frac{220^2}{1500 \cdot \frac{\pi}{30}} \cdot \frac{0,02}{(0,01 + 0,02)^2 + 0,6^2}$$

$$\boxed{C_d = 17,07\ \text{Nm.}}$$

Par resistente de la carga:

Potencia consumida: $P_r = 15$ kW a 1480 rpm

$$\boxed{C_r = \frac{15\ 10^3\ W}{1480 \cdot \frac{\pi}{30}} = 96,78\ \text{Nm.}}$$

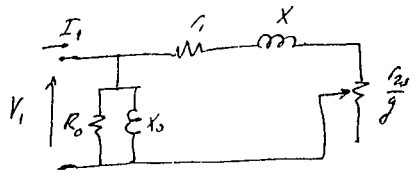
$C_d < C_r$.

M_1 no arranca.

cuito equivalente por fase (en λ equiv.) de M2.

M2: Valores nominales: 440 V, 60 Hz, rotor bobinado, λ-λ.

a) Circuito equivalente en λ, bajo condiciones nominales, (conexión λ) (coincide con los valores de fase).



Si se considera despreciable la corriente de vacío (a los efectos del problema), no interesa determinar R_0 ni X_0. (Son $\simeq \infty$).

$$\boxed{r_1 = r_f = 0{,}03\ \Omega}$$

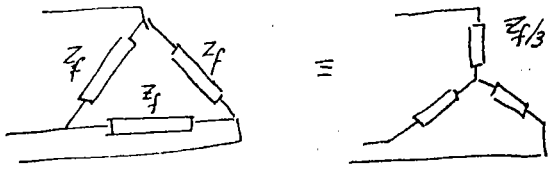
$$\boxed{r_{2s} = \left(\frac{U_1}{U_2}\right)^2 \cdot r_f = \underbrace{\left(\frac{440}{311}\right)^2}_{2{,}00} \cdot 0{,}60 = 1{,}2\ \Omega}$$

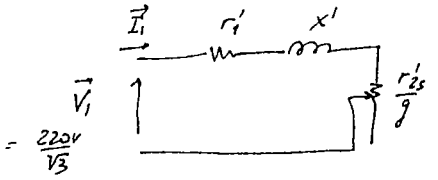
$$C_d\Big|_{g=1} = \frac{U_1^2}{\Omega_s} \cdot \frac{r_{2s}}{(r_1+r_{2s})^2 + X^2}$$

$$(r_1+r_{2s})^2 + X^2 = \frac{U_1^2 \cdot r_{2s}}{C_d \cdot \Omega_s} \Rightarrow X = \sqrt{\frac{U_1^2 \cdot r_{2s}}{C_d \cdot \Omega_s} - (r_1+r_{2s})^2} = \sqrt{\frac{440^2 \cdot 1{,}2}{200 \cdot \frac{1800\pi}{30}} - 1{,}23^2}$$

$$\boxed{X_f = 2{,}156\ \Omega}$$

b) Circuito equiv., en λ equiv, para conexión Δ, con 220 V, 50 Hz.





$$\boxed{r_1' = \frac{1}{3} r_1 = 0{,}01\ \Omega}$$

$$\boxed{r_{2s}' = \frac{1}{3} r_{2s} = 0{,}40\ \Omega}$$

$$\boxed{X' = \frac{1}{3}\left(\frac{50}{60}\right) \cdot X_f = \frac{1}{3}\,\frac{5}{6} \cdot 2{,}156 = 0{,}5988 \simeq 0{,}60\ \Omega}$$

Par de arranque en las mismas condiciones:

$$\boxed{C_d = \frac{U_1^2}{\Omega_s} \cdot \frac{r_{2s}'}{(r_1'+r_{2s}')^2 + X'^2} = \frac{220^2}{1500 \cdot \frac{\pi}{30}} \cdot \frac{0{,}4}{(0{,}01+0{,}40)^2 + 0{,}60^2} = 233{,}4\ \text{Nm.}}$$

Par de arranque del conjunto de los 2 motores

$$\boxed{C_d = C_{d_{M1}} + C_{d_{M2}} = 17{,}07 + 233{,}4 = 250{,}5\ \text{Nm} > 96{,}78\ \text{Nm.}}$$

arranque posible.

Con M2 conectado en λ bajo 220V, 50 Hz, se tendría: $C_d' = \frac{C_{d_{M2}}}{3} = 77{,}8$ Nm.

y el par total: $C = 17{,}07 + 77{,}8 = 94{,}87$ Nm. $< 96{,}78$ Nm.

DEPARTAMENTO DE DOCUMENTACIÓN Y BIBLIOTECA · FAC. INGENIERIA

INSTITUTO DE INGENIERÍA ELÉCTRICA **JULIO 2001.**
EXÁMENES DE: CONVERSIÓN ELECTROMECÁNICA
MÁQUINAS ELÉCTRICAS.

PROBLEMA 2.

En una planta industrial se está estudiando la viabilidad técnico-económica de la cogeneración en paralelo con la red de distribución de la compañía eléctrica la cual se supondrá de potencia de cortocicuito infinita y de tensión constante de 6 kV entre líneas..

Hasta el momento la planta es alimentada por la red pública en 6 kV y presenta un consumo pico de potencia activa de 625 kW con un mínimo de 100 kW, el factor de potencia es constante en 0,92 inductivo para cualquier estado de carga.

Se está estudiando la incorporación de un generador sincrónico de 500 kVA, movido por una turbina, dos polos, entrehierro constante y localizado a cierta distancia de las barras principales.

La turbina, a gas natural, se supondrá de velocidad constante para cualquier condición y es capaz de entregar una potencia útil mecánica en su eje en el rango de 0 a 535 HP (400 kW)

Hasta el momento se ha decido conectar la máquina a barras de 6 kV a través de un transformador y un cable para los cuales se han asumido los siguientes datos:

Maq. Sincrónica: Potencia Aparente 500 kVA, conexión Y, tensión nominal 2 kV entre línea , reactancia sincrónica (x_s)= 1 p.u. supuesta reactiva pura y constante para cualquier condición de la máquina., relación tensión en bornes en vacío a la corriente de excitación (E_L/i) = 1000 V/A supuesta constante para cualquier condición.

Transformador: Potencia Aparente 500 kVA, conexión Δ/Y tensiones 2/6 kV de línea, reactancia de cortocicuito (x_T) = 0,1 p.u. supuesta reactiva pura y despreciándose la impedancia de vacío.

Cable: Reactancia total 0,2 p.u. inductiva pura, en base 500 kVA.

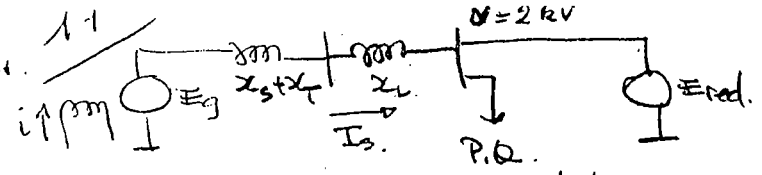
El esquema de la instalación se indica en la figura.

En estas condiciones el director del proyecto le solicita a Ud. la realización de los siguientes cálculos, funcionando siempre el generador en paralelo con la red:

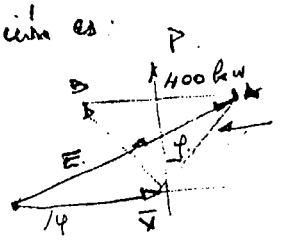
1) Determinar el mayor valor de la corriente de excitación del generador para que con su corriente nominal de línea, entregue la potencia activa máxima posible .
2) Determinar la excitación del generador cuando la planta se encuentra en su consumo mínimo y de tal manera que la corriente con la red pública sea nula.
3) Partiendo del generador operando como en la situación anterior, plantear la condición que permita determinar el máximo valor de carga activa proveniente de la red, que es posible aplicarle en forma brusca al generador compatible con un funcionamiento dinámicamente estable. (Se supone que las variaciones bruscas de cargas pueden ser "tomadas" por el generador antes que por la red).
4) Si en lugar del modelo de la reactancia sincrónica utilizara el modelo de Potier para el generador donde la $X_p < X_s$ y $\alpha > 0$, discuta cualitativamente (sin cálculos) si es posible aplicar la metodología empleada en la parte anterior a fin de estudiar la estabilidad dinámica. Justifique su respuesta.

Nota: Para la parte 3) solo se pide dejar planteada explicitamente la ecuación que permite determinar la potencia solicitada, **no se pide resolverla.**

Del lado generador. 1.1



La situación es:



La $\hat{P} = 400$ kW $= \hat{P}_{max.}$ de la turbina

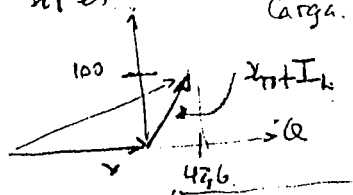
$\overbrace{(x_s+x_T+x_L)}^{1,3} I_{Ng}$ ⇒ como es el mayor tomo A.-

$\Rightarrow \cos\varphi = \frac{400 \cdot 10^3}{500\ 10^3} = 0.8$

Por otra parte $(x_s+x_T+x_L) I_{Ng} = 1,3 \frac{U^2}{S} \frac{S}{\sqrt{3}U} = \frac{1,3}{\sqrt{3}} U = 1.5$ kV

$\Rightarrow E = \sqrt{(V + 1.500 \times 0,6)^2 + (1.500 \times 0,8)^2} = \therefore V = \frac{2000}{\sqrt{3}} \Rightarrow E_f = 2379 \Rightarrow \boxed{i = 4,12 A.}$

La sit es

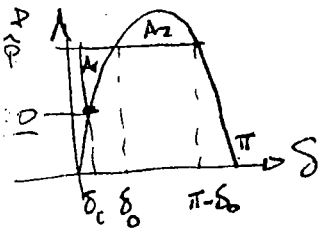


Carga. $P = 100$ $\cos\varphi = 0,92 \Rightarrow Q = 42,6$ kVar $\Rightarrow I_L = \frac{100\ 10^3}{\sqrt{3} \times 2000 \times 0,92} = 31,44$.

$Z_{Tot.} = 1,3 \frac{U^2}{S} = 1,3 \frac{(2.000)^2}{500.000} = 10,4\ \Omega$.

$\Rightarrow E = \sqrt{\left(\frac{2000}{\sqrt{3}} + 10.4 \times 31,4 \times 0,39\right)^2 + (10.4 \times 31.4 \times 0,92)^2} = 1316. \Rightarrow \boxed{i = 2,28 A}$

1. Como Ered y Eg son cte. y frec. constante ⇒ ley de Areas $A_1 = A_2$

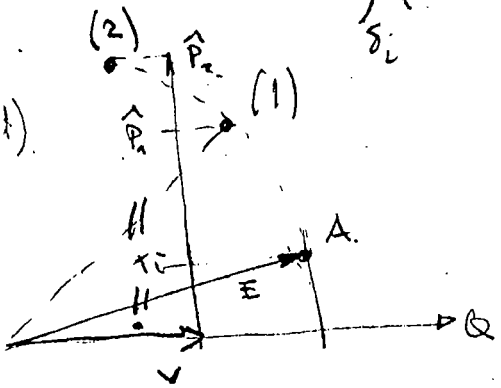


Estado inicial. $3 \times \underbrace{\frac{1316 \times 2000/\sqrt{3}}{10,4}}_{438.342} \operatorname{sen}\delta = 100.000$.

$\Rightarrow \boxed{\delta_i = 13,2^\circ}$

$\int_{\delta_i}^{\delta_0} (\hat{P} - 438.342 \operatorname{sen}\delta)\, d\delta = \int_{\delta_0}^{\pi - \delta_0} (438.342 \operatorname{sen}\delta - \hat{P})\, d\delta \therefore \hat{P} = 438.342 \cos\delta_0$

1)



Parto de A

Si el resultado final P_f es tal que la maquina sigue entregando reactiva (1) Potier tendría una corriente desmagnetizante.

daría tensiones de salida menor con lo cual $E_g \downarrow$ y $\hat{P} \downarrow$.

Si el resultado final es tal que la maq. absorve reactiva. (2) Potier tendría una corriente magnetizante daría tensiones de salida mayores con lo cual $E_g \uparrow$ y $\hat{P} \uparrow$.

⇒ No es posible pues la tensión varía instante a instante.