

52101414

Examen de: **MAQUINAS ELECTRICAS I (Planes 1991 y 1987)**
MAQUINAS ELECTRICAS (Plan 1974)
CONVERSION ELECTROMECHANICA (Opc. Plan 1991)

4 de Febrero 2000

Problema N°1

Se tiene un motor de inducción trifásico, de rotor de jaula, cuyos datos nominales de acuerdo a la chapa son: 20 HP, 220 V, conectado en estrella, 50 Hz, 4 polos.

El motor fue ensayado en vacío, bajo tensión y frecuencia nominales, consumiendo 12 A y 810 W. En un ensayo en corto-circuito con rotor bloqueado, realizado a 50 Hz y con una tensión de 25 V entre fases, consumió 52.9 A y 1600 W. La resistencia estática, por fase, es de 0.12 Ω .

Se pide:

- 1) Calcular la corriente nominal y el factor de potencia nominal del motor.
 - 2) Para el arranque se inserta entre el motor y la red de alimentación un transformador trifásico Yy. Admitiendo un modelo de transformador ideal, y despreciando las pérdidas mecánicas y en el hierro del motor en el momento del arranque, calcular la relación de transformación de ese transformador a efectos de que la corriente tomada a la red en el arranque sea igual al doble de la corriente nominal del motor.
 - 3) Determinar la potencia aparente nominal que debe tener ese transformador de arranque sabiendo que, por su servicio intermitente, se admite en sus bobinados una densidad de corriente cuatro veces superior a la que normalmente se admitiría para un servicio continuo.
 - 4) Si en lugar de un transformador se eligiera un autotransformador, también Yy, determinar cuál sería la potencia aparente para la cual se diseñarían las bobinas del autotransformador, satisfaciendo las condiciones en 2) y 3).
-



PB. 1 - Solución propuesta.

Datos: $P_n = 20 \text{ HP} = 20 \times 745 \text{ W} = 14900 \text{ W}$
 $U_n = 220 \text{ V}$
 $f_n = 50 \text{ Hz}$
 4 polos
 $R_s = 0,12 \Omega$

Ensayo en vacío:

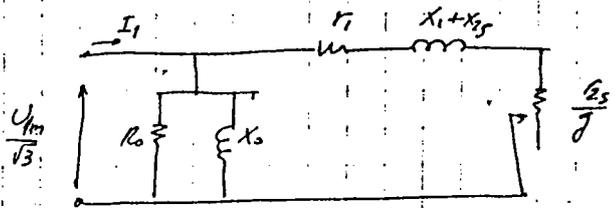
$U_{10} = 220 \text{ V}$
 $I_{10} = 12 \text{ A}$
 $P_{10} = 810 \text{ W}$

Ensayo en cc a r.b.

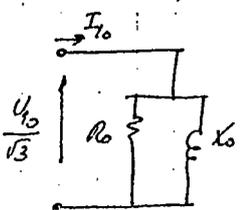
$U_{icc} = 25 \text{ V}$
 $I_{icc} = 52,9 \text{ A}$
 $P_{icc} = 1600 \text{ W}$



Circuito equivalente del motor (en Ω), por fase.



a) En vacío



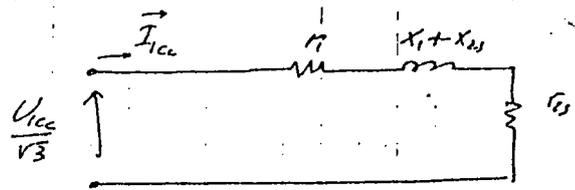
$$P_{10} = 3 \frac{\left(\frac{U_{10}}{\sqrt{3}}\right)^2}{R_0} = \frac{U_{10}^2}{R_0} \Rightarrow R_0 = \frac{U_{10}^2}{P_{10}} = \frac{220^2}{810}$$

$$\boxed{R_0 = 59,75 \Omega}$$

$$Q_{10} = 3 \frac{\left(\frac{U_{10}}{\sqrt{3}}\right)^2}{X_0} = \frac{U_{10}^2}{X_0} \Rightarrow X_0 = \frac{U_{10}^2}{P_{10}}$$

$$\boxed{X_0 = \frac{U_{10}^2}{\sqrt{3U_{10}^2 I_{10}^2 - P_{10}^2}} = \frac{220^2}{\sqrt{3 \cdot 220^2 \cdot 12^2 - 810^2}} = 10,75 \Omega}$$

b) En cc. a rotor bloqueado (despreciando la corriente por la rama II ($R_0 \parallel X_0$)).



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

$$r_1 + r_{2s} = \frac{P_{icc}}{3 I_{icc}^2} = \frac{1600}{3 \cdot 52,9^2}$$

$$r_1 + r_{2s} = 0,1906 \Omega \quad \left. \begin{array}{l} \\ \\ \end{array} \right\} \Rightarrow \boxed{r_{2s} = 0,0706 \Omega}$$

$$r_1 = 0,12 \Omega$$

$$\left(\frac{U_{icc}}{\sqrt{3}}\right)^2 = [(r_1 + r_{2s})^2 + (X_1 + X_{2s})^2] \cdot I_{icc}^2$$

$$\boxed{X_1 + X_{2s} = \sqrt{\frac{U_{icc}^2}{3 I_{icc}^2} - (r_1 + r_{2s})^2} = \sqrt{\frac{25^2}{3 \cdot 52,9^2} - 0,1906^2} = 0,1952 \Omega}$$



1) $I_{1n}, \cos \varphi_{1n}$
Cálculo de g_n

$$C_n = C(g=g_n) = \frac{3 \left(\frac{U_{1n}}{\sqrt{3}} \right)^2}{\left(\frac{\omega}{P} \right)} \cdot \frac{\frac{r_{2s}}{g_n}}{\left(r_1 + \frac{r_{2s}}{g_n} \right)^2 + (X_1 + X_{2s})^2}$$

$$P_n = C_n \Omega_n = \left(\frac{\omega}{P} \right) (1-g_n) \frac{U_{1n}^2}{\left(\frac{\omega}{P} \right)} \cdot \frac{\frac{r_{2s}}{g_n}}{\left(r_1 + \frac{r_{2s}}{g_n} \right)^2 + (X_1 + X_{2s})^2}$$

$$\Rightarrow r_1^2 g_n + 2 r_1 r_{2s} + \frac{r_{2s}^2}{g_n} + (X_1 + X_{2s})^2 g_n = \frac{U_{1n}^2}{P_n} (1-g_n) r_{2s}$$

$$\Rightarrow \left[r_1^2 + \frac{U_{1n}^2}{P_n} r_{2s} + (X_1 + X_{2s})^2 \right] g_n^2 + \left[2 r_1 r_{2s} - \frac{U_{1n}^2}{P_n} r_{2s} \right] g_n + r_{2s}^2 = 0$$

$$\left(0,12^2 + \frac{220^2}{14900} \cdot 0,0706 + 0,1952^2 \right) g_n^2 + 0,0706 \left(2 \cdot 0,12 - \frac{220^2}{14900} \right) g_n + 0,0706^2 = 0$$

$$\boxed{0,2818 g_n^2 - 0,2124 g_n + 4,984 \cdot 10^{-3} = 0}$$

$$g_n = \frac{0,2124 \pm \sqrt{0,2124^2 - 4 \cdot 0,2818 \cdot 4,984 \cdot 10^{-3}}}{2 \cdot 0,2818} = \begin{cases} 0,0242 \\ 0,729 \end{cases}$$

$$\boxed{g_n = 2,4 \%} = \underline{\underline{0,024}}$$

$$\vec{I}_{1n} = \vec{V}_1 \left[\frac{1}{R_0} - j \frac{1}{X_0} + \frac{1}{\left(r_1 + \frac{r_{2s}}{g_n} \right) + j (X_1 + X_{2s})} \right]$$

$$\vec{I}_{1n} = (127 \text{ V} \angle 0) \cdot \left[\frac{1}{59,75} - j \frac{1}{10,75} + \frac{1}{\underbrace{\left(0,12 + \frac{0,0706}{0,024} \right)}_{3,062} + j 0,1952} \right]$$

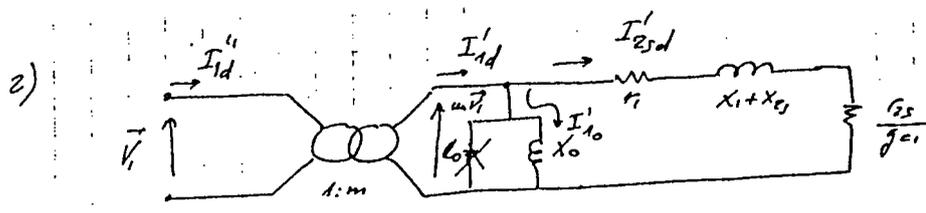
3,068 \angle 3,648

$$\vec{I}_{1n} = (127 \text{ V} \angle 0) \cdot \left[\frac{1}{59,75} - j \frac{1}{10,75} + 0,3253 - j 0,0207 \right] = 45,78 \text{ A} \angle -18,39$$

0,3604 \angle -18,39

$$\boxed{I_{1n} = 45,78 \text{ A}}$$

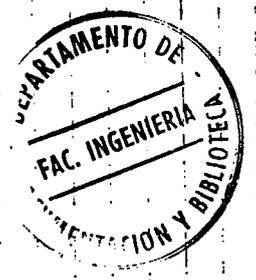
$$\boxed{\cos \varphi_{1n} = \cos (-18,39) = 0,949 \approx 0,95}$$



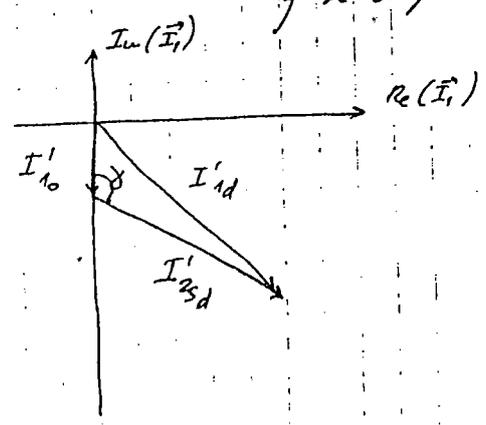
Hip. transformador ideal $V_0 = mV_1$
 $I'_{1d} = \frac{1}{m} I''_{1d}$

Se busca m tal que $I''_{1d} = 2 I_{Im}$

$$\Rightarrow \boxed{m I'_{1d} = 2 I_{Im} = 2 \times 45,78 \text{ A} = 91,56 \text{ A}}$$



Cálculo de I'_{1d} : Hipótesis simplificada: despreciamos la corriente por R_0 (sólo se considera la corriente magnetizante en el arranque y se desprecian las pérdidas mecánicas y en el hierro)



$$\vec{I}'_{1d} = \vec{I}'_{10} + \vec{I}'_{2sd}$$

$$\vec{I}'_{10} \approx -j \frac{mV_1}{X_0} \quad (\text{despreciando } R_0 \approx \infty)$$

$$I'_{2sd} = mV_1 \frac{1}{\sqrt{(r_1+r_2)^2 + (X_1+X_2)^2}}$$

$$I'^2_{1d} = |\vec{I}'_{1d}|^2 = I'^2_{10} + I'^2_{2sd} - 2 I'_{10} I'_{2sd} \cos \gamma$$

$$\cos \gamma = \cos \left(\frac{\pi}{2} - \arg(I'_{2sd}) \right) = -\sin(90^\circ - 45^\circ,68) = -\sin(44^\circ,32)$$

$$\tan(\arg(I'_{2sd})) = -\frac{X_1+X_2}{r_1+r_2} = -\frac{0,1952}{0,1906} = -1,024$$

$$\arg I'_{2sd} = 45^\circ,68$$

$$\Rightarrow \cos \gamma = -0,6986$$

$$\Rightarrow I'^2_{1d} = m^2 \cdot 127^2 \left[\frac{1}{10,75^2} + \frac{1}{0,1906^2 + 0,1952^2} + 2 \cdot \frac{1}{10,75} \cdot \frac{0,6986}{\sqrt{0,1906^2 + 0,1952^2}} \right]$$

$8,653 \cdot 10^3$
 $13,435$
 $0,476$

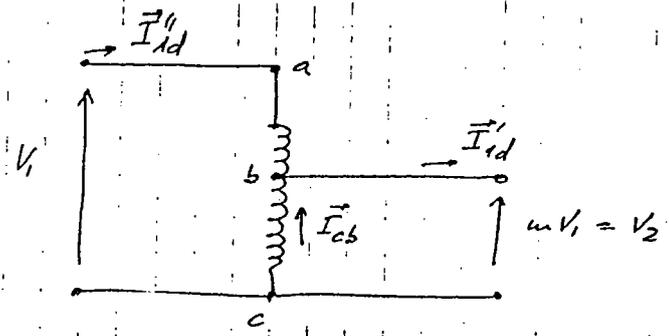
$$\boxed{I'^2_{1d} = m^2 \cdot 127^2 \cdot 13,92}$$

$$m (m \cdot 127 \cdot \sqrt{13,92}) = 91,56 \Rightarrow m^2 = \frac{91,56}{127 \sqrt{13,92}} = 0,1932$$

$$\boxed{m = 0,4396 \approx 0,44}$$

3) y 4) Potencia aparente de diseño del transformador y lo autotransformador.

Caso del autotransformador (ideal).



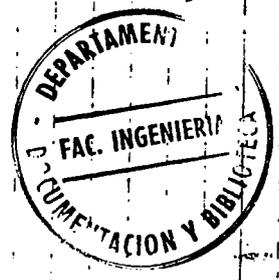
$$V_2 = uV_1$$

$$I'_{1d} = \frac{1}{u} I''_{1d}$$

Potencia aparente "externa" del autotrafo: $V_1 I''_{1d} = (uV_1) I'_{1d}$
 es igual a la potencia aparente de un transformador.
 En el autotrafo se tiene $I'_{1d} = I''_{1d} + I_{c_b}$ (relación escalar)

$$\Rightarrow \boxed{V_1 I''_{1d} = uV_1 (I''_{1d} + I_{c_b})}$$

$$= \boxed{uV_1 I''_{1d} + uV_1 I_{c_b}} \quad (*)$$



Potencia ~~de~~ aparente de diseño de la bobina:

- a) Para el tramo ab: $(V_1 - uV_1) I''_{1d} = (1-u) V_1 I''_{1d}$
- b) Para el tramo bc: $uV_1 \cdot I_{c_b} = V_1 I''_{1d} - uV_1 I''_{1d} = (1-u) V_1 I''_{1d}$
 \uparrow
 $(*)$

$$\Rightarrow \boxed{S_d = (1-u) S_{ext}}$$

la potencia aparente de diseño de la bobina del autotrafo S_d es $(1-u)$ veces la potencia aparente externa S_{ext} (por coincide con la del tramo)

Caso transformador:

$$S_{ext} = \sqrt{3} V_1 \underbrace{I''_{1d}}_{\approx 2I_n} = \sqrt{3} \cdot 220 \cdot 91,56 = 34889 \text{ VA} \approx 34,7 \text{ kVA}$$

pero si se admite una densidad de corriente 4 veces mayor a la normal

$$3) \Rightarrow \boxed{S_{ext} = \frac{34,9}{4} = 8,72 \text{ kVA.}}$$

Caso autotrafo

$$4) \boxed{S_{d \text{ autotr.}} = (1 - 0,44) \cdot S_{ext} = 0,56 \cdot 8,72 = 4,88 \text{ kVA}}$$

17

6/7

INSTITUTO DE INGENIERÍA ELÉCTRICA
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 cortocircuito 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

Se está estudiando la incorporación de un generador sincrónico de 500 kVA, movido por un motor de velocidad constante para cualquier condición, dos polos, entrehierro constante y localizado a cierta distancia de las barras principales.

Hasta el momento se ha decidido 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:

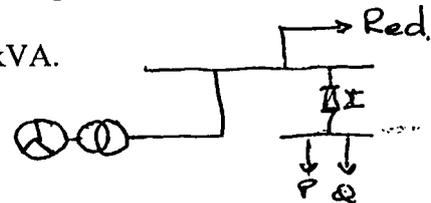
Maq. Sincrónica: Potencia Aparente 500 kVA, conexión Y, tensión nominal 2 kV entre línea, reactancia sincrónica (x_s) = 1 p.u. supuesta reactiva pura y constante para cualquier condición de la máquina., relación tensión en bornes en vacío a la corriente de excitación (E_L/i) = 1000 supuesta constante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

Transformador: Potencia Aparente 500 kVA, conexión Δ/Y tensiones 2/6 kV de línea, reactancia de cortocircuito (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:

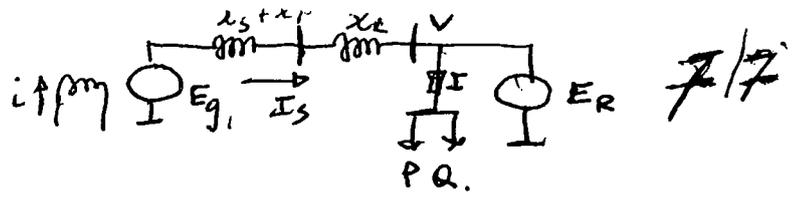


- 1) Determinar el valor de la corriente de excitación del generador para que con la planta desconectada (I abierto) el intercambio eléctrico con la red sea nulo.
- 2) Con la corriente de excitación en el valor calculado en 1) y admitiendo que es posible sobrecargar en corriente al grupo generador-transformador hasta un 25 %, determinar el máximo valor de potencia activa que puede entregar en régimen permanente el generador. En estas condiciones calcular el intercambio de potencia activa y reactiva con la red para una carga genérica de la instalación P kW, Q kVar.
- 3) Manteniendo la excitación anterior y partiendo del generador conectado en vacío, determinar el máximo valor de carga activa que es posible aplicarle en forma brusca (cierre del interruptor I) compatible con un funcionamiento dinámicamente estable. Se supone que las variaciones bruscas de cargas de la instalación pueden ser "tomadas" por el generador antes que por la red.
- 4) Determinar el valor que debe alcanzar la excitación para que el pico de carga activa de la instalación pueda ser suministrado totalmente por el generador propio. Considera alcanzable este valor en la realidad?
- 5) Si la empresa eléctrica no le admite que la instalación en condiciones normales solo intercambie energía reactiva con ella, cualitativamente, que solución propondría estudiar que no implique, desconectarse de la red pública ni aumentar la potencia del generador a adquirir.

Notas. La solución de la ecuación $\cos\delta + ((\delta - \pi) \cdot \text{sen}\delta) + 1 = 0$ es en grados $\delta = 46,44$



2) Trabajo lado generador

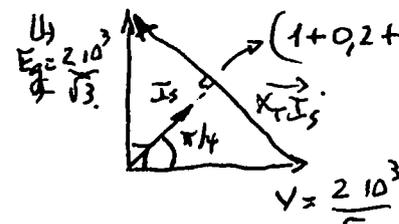


1) Si no hay intercambio, I abierta.

$\Rightarrow I_s = 0 \Rightarrow E_g = E_R = 2 \cdot 10^3 \Rightarrow |i| = 2$

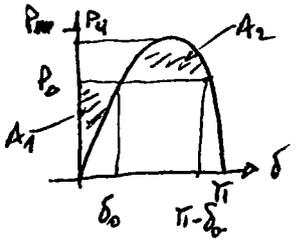
2) Los límites son por sobrecarga, o por límite estático. Sobrecarga $I < 1.25 \frac{P_N}{\sqrt{3} V_N} = 180$

Estabilidad. Si $i \neq 2 \Rightarrow E_{g2} = \frac{2 \cdot 10^3}{\sqrt{3}} \Rightarrow I = \frac{\sqrt{V^2 + E_g^2}}{\sqrt{3}} = \frac{\sqrt{2 \cdot 10^3}}{\sqrt{3}} \Rightarrow I = \frac{\sqrt{2} \cdot 2 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 1.3} = 157 \text{ A}$



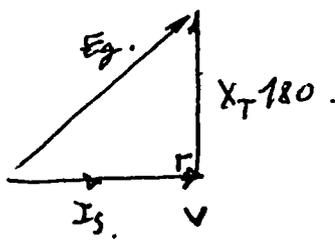
Luego $\hat{\delta} = \sqrt{3} \cdot 2 \cdot 10^3 = 157 \Rightarrow |S| = 544 \text{ kW} \Rightarrow \begin{cases} P_g = \frac{544}{\sqrt{2}} \approx 385 \text{ kW} \\ Q_g = -\frac{544}{\sqrt{2}} \approx -385 \text{ kW} \end{cases}$

3) Como V y Eg son cte y freq. constante \Rightarrow Ley de Areas $A_1 = A_2$



$P(\delta) = \frac{3 E_g V}{X_T} \sin \delta \Rightarrow \int_{\delta_0}^{\pi - \delta_0} (P_0 - P(\delta)) d\delta = \int_{\delta_0}^{\pi - \delta_0} (P(\delta) - P_0) d\delta$
 Si opera $\delta_0 = 46,44^\circ \Rightarrow \hat{P} = \frac{(2 \cdot 10^3)^2}{1.3 \cdot (2 \cdot 10^3)^2} \sin 46,44 = \frac{500 \cdot 10^3}{1.3} \sin 46,44 = 279 \text{ kW}$

4) Quiero que el límite sea por sobrecarga, y toda sea activa la corriente del generador. $\Rightarrow I_s = 180$



$\Rightarrow E_g = \sqrt{V^2 + (X_T 180)^2} = \sqrt{\left(\frac{2 \cdot 10^3}{\sqrt{3}}\right)^2 + \left(1.3 \frac{2 \cdot 10^3}{500 \cdot 10^3} \cdot 180\right)^2} = 2200$
 $\Rightarrow |i| = 3,84$. No es alcanzable por tensión.

5) Condensadores, en compensación automática en barras.

Handwritten signature or mark.

