

Examen de: **MAQUINAS ELECTRICAS (Planes 1997 y 1974)**
MAQUINAS ELECTRICAS I (Planes 1991 y 1987)
CONVERSION ELECTROMECANICA (Opc. Plan 1991)

5 de Marzo 2001.

Problema No. 1

En una pequeña planta industrial se instala un motor sincrónico MS para accionar un compresor de aire que consume una potencia de 18 kW a 1500 rpm.

Datos de MS: valores nominales de acuerdo a la chapa:

70 kVA, 50 Hz, 400 V montaje estrella, 101 A, $\cos \phi = 1$, 4 polos.

MS está provisto de un sistema de excitación del cual se dispone de poca información, y por esa razón se decide en primera instancia no modificar la regulación de su corriente de excitación del valor preestablecido por el fabricante, y que corresponde al punto de funcionamiento nominal.

En la instalación considerada se alimenta MS a partir de la red trifásica (sin neutro) de 220 V, 50 Hz, para lo cual se le cambia el conexionado a triángulo. En esas condiciones, y antes de acopiarlo mecánicamente al compresor, se midió una corriente de línea de 76.4 A.

Se pide:

- 1) Calcular la corriente de línea y el factor de potencia de MS cuando funcione cargado por el compresor, en la red indicada.
- 2) Antes del montaje del grupo MS-compresor la planta presentaba consumos eléctricos mensuales medios de 1940 kWh y 938 kVARh. Sabiendo que el grupo MS-compresor trabaja 200 h/mes, y que no hay otros cambios en la instalación, calcular los nuevos consumos eléctricos mensuales medios de la planta.
- 3) La tarifa de la energía eléctrica cobra la reactiva si el factor de potencia medio mensual es inferior a 0.85. Se pide corregir la instalación, de la forma más sensata, de modo de no tener que pagar por concepto de reactiva, analizando las siguientes alternativas (excluyentes):
 - a) Especificando un circuito pasivo de compensación. Dar los componentes, sus valores, y su conexionado.
 - b) Modificando la regulación de la excitación de MS. Determinar el rango de variación (en proporción al valor preestablecido por el fabricante) dentro del cual deberá fijarse la nueva corriente de excitación a efectos de no tener penalización por bajo factor de potencia. Indicar, dentro de ese rango, cuál puede ser el valor preferible, y con qué criterio.

Notas y datos complementarios:

- A los efectos de la resolución del problema, se supondrá despreciables la resistencia del bobinado de cada fase de MS, y también todas las pérdidas: Joule en el estator y rotor, pérdidas en el hierro, y pérdidas mecánicas en el eje.
- Por razones constructivas de MS, se sabe que su reactancia sincrónica no puede ser inferior a 0.5 p.u.
- Para MS se adoptará un modelo de polos lisos y sin saturación.

Determinación de E_n y X_s : (Se adopta conv. de signos al revés (o generador))

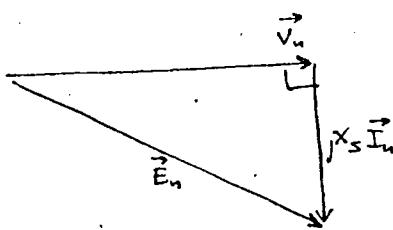
a) Func. nominal

$$U_n = 400 \text{ V}$$

$$V_n = \frac{400 \text{ V}}{\sqrt{3}} = 230.94 \text{ V} \approx 231 \text{ V}$$

$$\textcircled{1} \quad \boxed{E_n^2 = V_n^2 + (X_s I_n)^2}$$

Diagrama por falso: (\equiv auto falso y neutro)



b) Func. en vacío, en Δ ,
en la red de la planta isol.

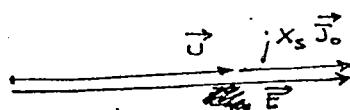
$$U = 220 \text{ V} ; \quad J_0 = \frac{I_0}{\sqrt{3}}$$

$$\text{De } \textcircled{1} \Rightarrow E_n > V_n \approx 231 \text{ V} > 220 \text{ V}$$

Sin resistencia ni pérdidas.

$$\text{con } |\vec{E}| = E_n.$$

Diagrama por falso (\neq auto falso y neutro)



$$\textcircled{2} \quad \boxed{E_n = U + X_s \frac{I_0}{\sqrt{3}}}$$

$$\textcircled{1} \text{ y } \textcircled{2} \rightarrow U^2 + 2U \frac{I_0}{\sqrt{3}} X_s + X_s^2 \frac{I_0^2}{3} = V_n^2 + X_s^2 I_n^2$$

$$\textcircled{3} \quad \boxed{\left(I_n^2 - \frac{I_0^2}{3} \right) X_s^2 - 2U \frac{I_0}{\sqrt{3}} X_s + (V_n^2 - U^2) = 0}$$

$$\left(101^2 - \frac{76.4^2}{3} \right) X_s^2 - 2 \cdot 220 \cdot \frac{76.4}{\sqrt{3}} X_s + \left(\frac{400^2}{3} - 220^2 \right) = 0$$

$$8255.3 X_s^2 - 19408.2 X_s + 4933.3 = 0 \Rightarrow X_s = \begin{cases} 2.061 \Omega \\ 0.290 \Omega \end{cases}$$

$$\text{Si } X_s = 2.061 \Omega \rightarrow X_s (\text{p.u.}) = \frac{2.061}{\left(\frac{V_n}{I_n} \right)} = \frac{2.061}{\left(\frac{400}{\sqrt{3} \cdot 101} \right)} = 0.901$$

$$\text{Si } X_s = 0.290 \Omega \rightarrow X_s (\text{p.u.}) = \frac{0.290}{\left(\frac{V_n}{I_n} \right)} = \frac{0.290}{\left(\frac{400}{\sqrt{3} \cdot 101} \right)} = 0.127, \text{ se descarta}$$

pues $X_s > 0.50$
(tip. dist).

Solución:

$$\boxed{\begin{aligned} X_s &= 2.061 \Omega \\ E_n &= 220 + 2.061 \cdot \frac{76.4}{\sqrt{3}} = 310.9 \text{ V} \end{aligned}}$$

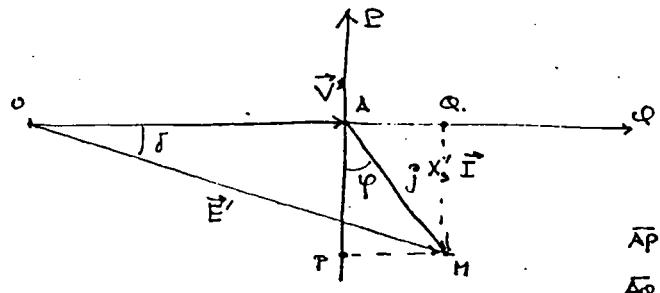
Para el funcionamiento en Δ , en la red de Δ se pone en paralelo, con una esquina en λ equivalente, con

$$V' = \frac{220}{\sqrt{3}} = 127 \text{ V}$$

$$E' = \frac{E_n}{\sqrt{3}} = \frac{310.9}{\sqrt{3}} = 179.5 \text{ V}$$

$$x'_s = X'_{s\Delta} = \frac{2 \cdot 0.687}{3} = 0.687 \Omega$$

c) Func. en carga, en Δ , representado en λ equiv.



$$\overline{AP} = X'_s I \cos \varphi$$

$$\overline{AQ} = X'_s I \sin \varphi$$

También

$$\overline{AP} = X'_s I \cos \varphi = E' \sin \delta$$

$$\overline{AQ} = E' \cos \delta - V'$$

$$P = 3V'I \cos \varphi = \left(\frac{3V'}{X'_s} \right) \overline{AP}$$

$$\Rightarrow \overline{AP} = \frac{X'_s}{3V'} P = E' \sin \delta \Rightarrow \sin \delta = \frac{X'_s}{3V'} \frac{P}{E'}$$

$$\sin \delta = \frac{0.687}{3 \cdot 127} \cdot \frac{18 \cdot 10^3}{179.5} = 0.1808 \rightarrow \boxed{\delta = 10.417}$$

$$\overline{AQ} = E' \cos \delta - V' = 179.5 \cos 10.417 - 127 = 49.54 \text{ V.}$$

$$\overline{AP} = E' \sin \delta = 179.5 \cdot 0.1808 = 32.45 \text{ V.}$$

$$\tan \varphi = \frac{\overline{AQ}}{\overline{AP}} = \frac{49.54}{32.45} = 1.5267 \rightarrow \varphi = 56.77^\circ$$

$$\begin{aligned} & \Rightarrow \boxed{\cos \varphi = 0.5479} \\ & X'_s I = \sqrt{\overline{AP}^2 + \overline{AQ}^2} = \sqrt{32.45^2 + 49.54^2} = 51.22 \text{ V} \\ & \boxed{I = 86.20 \text{ A}} \end{aligned}$$

2) MS : $P = -18 \text{ kW}$
 $Q = \sqrt{3} \cdot U I \sin \varphi = \sqrt{3} \cdot 220 \cdot 86.2 \sin 56.77 = 27,478 \text{ kVAR}$

Nuevos consumos mensuales medios: (Conv. de signo receptor: consumo > 0 si $P < 0$) $\left\{ \begin{array}{l} P < 0 \\ Q < 0 \end{array} \right.$

$$\boxed{E_{act} = 1940 + 18 \cdot 200 = 5540 \text{ kWh.}}$$

$$\boxed{E_{react} = 938 - 27,478 \cdot 200 = -4557.6 \text{ kVArh.}}$$

3) Factor de potencia de la instalación:

$$\operatorname{tg} \varphi' = \frac{E_{react}}{E_{act}} = \frac{-4557.6}{5540} = -0,82267 \rightarrow \varphi' = -39^\circ 443$$

$$\boxed{\cos \varphi' = 0,7723}, \underline{\text{carga capacitiva}}$$

- a) Se quiere conseguir $\cos \varphi'' = 0,85$. Lo más sencillo es dejar la carga con comportamiento capacitivo, compensando con una inductancia (trifásica). Si se quisiera conseguir a $\cos \varphi''$ mayor, se llevaría la carga a inductiva, la inductancia de compensación debería ser aún mayor, y no tendría sentido económico, pues la penalización de $\cos \varphi$ en la tarifa no cuestiona que la carga sea capacitiva o inductiva si $\cos \varphi \geq 0,85$.

$$\cos \varphi'' = 0,85 \rightarrow \operatorname{tg} \varphi'' = 0,6197 = \frac{|E''_{react}|}{E_{act}}$$

$$\Rightarrow E''_{react} = -0,6197 E_{act} = -3433,4 \text{ kVArh.}$$

$$E''_{react} = -4557,6 + E_{rL} = -3433,4$$

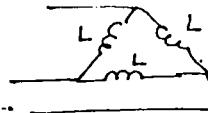
$$E_{rL} = 1124,2 \text{ kVArh.} \rightarrow Q_{rL} = \frac{E_{rL}}{\text{nº de horas del mes medio}}$$

$$\text{Si el mes medio tiene } \frac{365 \times 24 \text{ h}}{12} = 730 \text{ horas}$$

$$\boxed{Q_{rL} = 1,54 \text{ kVAR}}$$

Esto implica conectar las inductancias en forma permanente a la instalación.

Conectando las inductancias en Δ :



$$Q = 3 \frac{U^2}{wL} \Rightarrow L = \frac{3U^2}{wQ} = \frac{3 \cdot 220^2}{100\pi \cdot 1540} = 0,300 \text{ H}$$

$$L_{\Delta} = 300 \text{ mH}$$

$$\text{Si se conectan en } \lambda \rightarrow L_{\lambda} = \frac{1}{3} L_{\Delta} = 100 \text{ mH}$$

- b) Si se modifica la excitación de MS.

En conv. de signo receptor:

$$E_{at} = E_a + E_{ans} = 1940 + 18 \cdot 200 = 5540 \text{ kVWh}$$

$$E_{rt} = E_r + E_{rms} = 938 + E_{rms} \text{ kVArh}$$

$$\text{Se quiere } \cos \varphi = 0,85, \text{ capacativo o inductivo} \rightarrow |\operatorname{tg} \varphi| = 0,6197$$

$$\Rightarrow |E_r + E_{rms}| = 0,6197 \cdot (E_a + E_{ans}) = 0,6197 \cdot 5540 = 3433,4 \text{ kVArh}$$

$$b_1) E_r + E_{rms_1} = -3433,4 \rightarrow E_{rms_1} = -(3433,4 + 938) = -4371,4 \text{ kVArh}$$

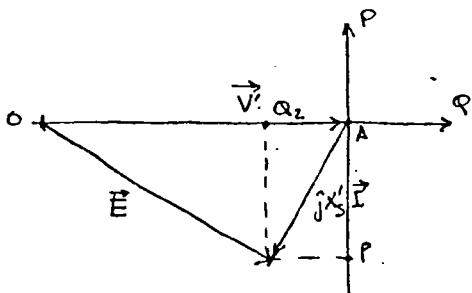
$$b_2) E_r + E_{rms} = +3433,4 \rightarrow E_{rms_2} = 2495,4 \text{ kVArh.}$$

$$\text{Teniendo en cuenta que MS trabaja } 200 \text{ h/mes} \rightarrow \begin{cases} Q_{MS_1} = -\frac{4371,4}{200} = -21,857 \text{ kVAR} \\ Q_{MS_2} = \frac{2495,4}{200} = 12,477 \text{ kVAR} \end{cases}$$

Pasando a conv. de signo generador:

$$Q_{MS_1} = 21,857 \text{ kVAR}$$

$$Q_{MS_2} = -12,477 \text{ kVAR.}$$



$$AP = \frac{X_s}{3V} \cdot P = \frac{0,687 \cdot 18 \cdot 10^3}{3 \cdot 127} = 32,456 \text{ V}$$

$$AQ_1 = \frac{0,687}{3 \cdot 127} \cdot 21857 = 39,411 \text{ V.}$$

$$E_1 = \sqrt{(127 + 39,411)^2 + 32,456^2} = 169,55 \text{ V.}$$

$$\hat{i}_{exc_1} = \frac{169,55}{179,5} = 0,94 \hat{i}_{exc.}$$

$$\Delta Q_2 = \frac{0,687}{3 \cdot 127} (-12477) = -22,498 \text{ V}$$

$$E_2 = \sqrt{(127 - 22,498)^2 + 32,456^2} = 109,43 \text{ V}$$

$$\hat{i}_{exc_2} = \frac{109,43}{179,5} = 0,61 \hat{i}_{exc.}$$

La corriente de excitación de MS debería estar comprendida entre

$$0,61 \hat{i}_{exc.} < \hat{i}_{exc} < 0,94 \hat{i}_{exc.}$$

Valor preferido: $Q_{MS} = 0 \Rightarrow E^* = \sqrt{127^2 + 32,456^2} = 131,08$

$\hat{i}_{exc} = 0,73 \hat{i}_{exc.}$ para que no se colapse receptor.

minimizando I .

(17)

EXÁMEN DE MÁQUINAS ELÉCTRICAS

MARZO 2001

PROBLEMA 1.

En la instalación de la figura un motor de inducción MI se alimenta desde la red a través de un transformador T. Se tiene conectada además una máquina sincrónica MS que se utiliza como compresor sincrónico pero que puede, además, funcionar eventualmente como cogenerador conectado a la red dando que la industria produce vapor para otros procesos.

Es necesario por razones del proceso industrial (papelera) mantener constante en 1460 rpm la velocidad de la MI, sabiendo que esta puede tener variaciones esporádicas de carga entre el 75% y el 100% de su valor nominal.

Asumiendo que la frecuencia de la red es constante se pide:

- 1) Determinar el modelo eléctrico estrella equivalente en régimen de la instalación especificando en él el valor de sus parámetros con potencia base de 100kVA.
- 2) Determinar las tensiones necesarias a disponer en barras de la instalación para los valores extremos de variación de la carga de MI.
- 3) Se utiliza la MS para regular la tensión a los valores indicados en 2). Que porcentaje de sobreexcitación en corriente se debe admitir en MS para que además genere en forma permanente 40kW?
- 4) Determine el rango de la corriente de excitación de MS para la situación indicada en 3)

Datos:

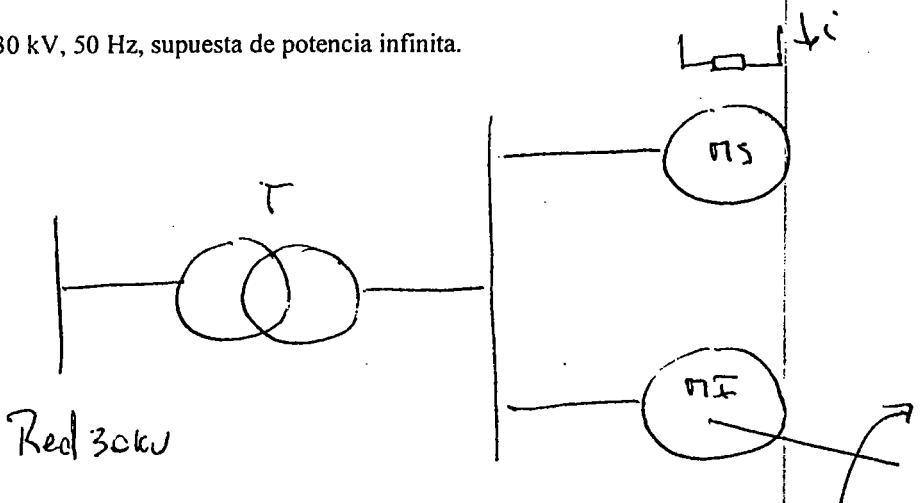
MS: 100 kVA, 50 Hz, 380V, $X_S = 20\%$, conexión estrella, sin pérdidas. Curva de Vacío $E(V)=50 i(A)$

MI: Alimentada bajo tensión nominal (380V) y frecuencia nominal (50Hz) y con la carga mecánica que corresponde a su potencia nominal, se midió un consumo eléctrico de 100 kVA con $\cos\phi = 0,8$ y una velocidad de 1450 rpm. Se desprecian las pérdidas mecánicas, del hierro y joule estatóricas.

Nota: Se adoptará el modelo aproximado para pequeños deslizamientos.

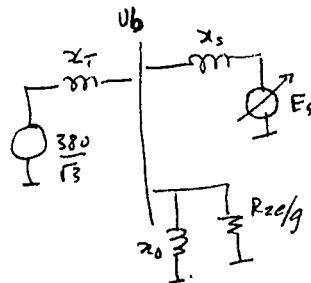
T: 200 kVA, 50 Hz, 30/0,38 kV, Y_d . $X_T = 12\%$. Pérdidas despreciables.

Red: 30 kV, 50 Hz, supuesta de potencia infinita.



7/7

Sol
1) Modelos



$$\text{HS} \Rightarrow Z_s = 0,2 \frac{V_N}{Z_N} \Rightarrow Z_s = 0,288 \Omega$$

$$\text{MI} \Rightarrow \text{Medida} \quad P = \frac{80}{3}, Q = 20$$

$$g = \frac{50}{1500}, Z_0 = 0,065 \Omega$$

$$\text{Como la mag. funciona a } 1460 \Rightarrow g = \frac{40}{1500} \Rightarrow \frac{R_{1e}}{g} = 2,25 \Omega$$

Para pasar a p.u. basta $380, 100 \text{ kVA}$ dividir los valores por.

$$T \Rightarrow Z_T = Z \frac{V_N^2}{P_N} \Rightarrow Z_T = 0,087 \Omega$$

$$2) \text{ Si } f \text{ y } n_R = \text{cte.} \Rightarrow W_E = \text{cte.} \Rightarrow \Delta C \propto \Delta P. \Rightarrow P_C [975 P_N; 0,85 I_N]$$

$$\text{Pero, } g \text{ tambien es cte.} \Rightarrow \frac{R_{1e}}{g} = \text{cte} = 2,25$$

$$\Rightarrow V_b : \frac{U_b^2}{2,25} = P \quad \text{y} \quad C_N W_N = P_N \Rightarrow C_N = P_N / W_N \Rightarrow P = C_E W_E \Rightarrow P = \frac{W_E}{W_N} \cdot P_N \quad \begin{cases} 0,75 \\ 0,85 \end{cases}$$

$$\Rightarrow P = \frac{1460}{1450} \cdot 0,75 \cdot 80 \text{ kW} \quad \text{y} \quad \bar{P} = \frac{1460}{1450} \cdot 0,85 \cdot 80 \text{ kW.} \Rightarrow \begin{cases} U_b = 369 \text{ V.} & \bar{P} = 60,4 \text{ kW.} \\ \bar{U}_b = 392 \text{ V.} & \bar{P} = 68,5 \text{ kW.} \end{cases}$$

$$3) \text{ La sit en. } U_b \xrightarrow{P=50} Q=? \quad \text{an. } Z_{NE} = Z_0 \parallel \frac{R_2}{j} = 1,64 \frac{1}{43} \text{ ohm mas nach.}$$

$$3.1. \text{ Cado. } U_b \bar{P} \Rightarrow \Delta P = 60,4 - 50 = 10,4 \text{ kW provee la red.}$$

$$\text{Para la red} \Rightarrow E_r U_b \sin \gamma = P = \frac{380 \cdot 369}{0,087} \quad \gamma = 10400 \quad \gamma = 0,34^\circ$$

$$\Rightarrow E_r \cos \gamma - U_b = Z_T \frac{Q_r}{U_b} \Rightarrow Q_r = 46,62 \text{ kVar.}$$

\Rightarrow La red aporta $10,4 \text{ kW}$ an $46,62 \text{ kVar.}$

Pero el motor consume $60,4 \text{ kW}$ y $\frac{369^2}{24} = 56,7 \text{ kVar.} \Rightarrow$

La MS aporta 50 kW an $56,7 - 46,62 = 10,11 \text{ kVar.}$

no hay sobrecarga.

$$3.2 \text{ Cado } U_b \bar{P} : \text{ Identico metodo} \Rightarrow \gamma = 0,62^\circ \quad Q_r = -54,2 \text{ kVar.}$$

\Rightarrow La red aporta $18,5 \text{ kW} - 54,2 \text{ kVar.} \Rightarrow$ MS aporta $50 \text{ kW. an } 54,2 \text{ kVar.}$

$$\Rightarrow S_{MS} = \sqrt{50^2 + 118,9^2} = 128 \cdot 10^3 \Rightarrow 28\%$$

4) Tengo P , Q , U_b . $\xleftarrow{U_b \frac{369}{392}}$ calculo i an $E(i) \Rightarrow [7,5 - 9A]$