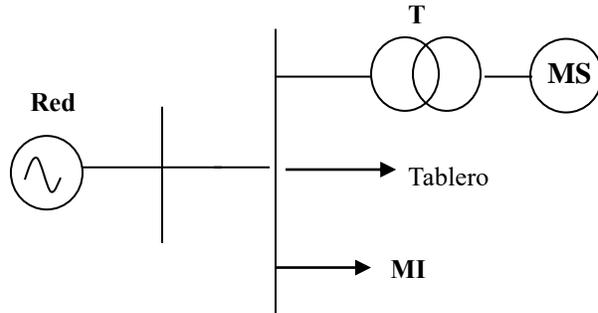


Problema No. 1 (17,5 puntos del curso)

Se dispone de una máquina sincrónica (MS) accionada por una turbina operando en paralelo con la red para alimentar el Tablero general de una planta industrial y un motor de Inducción (MI), acuerdo al siguiente esquema unifilar.



Considerando los datos que se indican más abajo se pide:

- 1) Valor de la corriente de excitación de MS si la máquina funciona como compensador sincrónico y el factor de potencia visto desde la red es 1. En esta parte MI se encuentra en vacío.
- 2) Valor de la corriente de excitación de MS si se opera la máquina entregando toda la potencia activa consumida por MI y el factor de potencia visto desde la red es 0.95 inductivo. En esta parte MI mueve en su eje una carga mecánica que le impone un par resistente de 770 N.m.

Datos

MS:

$U_n = 6000V, 50Hz, 210 \text{ kVA}$

Ensayo de vacío a 50 Hz:

$i \text{ (A)}$	5	10	15	20	25	30	39
$E \text{ (kV)}$	2.20	4.40	6.00	6.86	7.49	7.82	8.25

No se considera la resistencia del bobinado estático y no se consideran pérdidas mecánicas ni de ningún otro tipo en la máquina.

La reactancia de dispersión a 50 Hz posee un valor de 44.26Ω

Ensayo de cortocircuito a 50Hz:

Para $i = 10 \text{ A}$ se obtuvo $I_{cc} = 12 \text{ A}$.

T: 6.3/0.4 kV 500kVA $X_{cc} = 5\%$ 50 Hz.

Red: 0.4 kV 50 Hz.

MI: 400 V, 50 Hz, 150 kW, velocidad nominal 1470 rpm. En vacío a tensión y frecuencia nominal consume 75 A y potencia activa despreciable.

Tablero: consume una potencia de 150 kVA bajo un factor de potencia constante igual a 0.8 inductivo.

INSTITUTO DE INGENIERIA ELECTRICA - Departamento de POTENCIA
Curso de Máquinas Eléctricas (5602) – Parcial N°2 – 26 de noviembre de 2024

Problema No. 2 (17,5 puntos del curso)

Un motor de inducción (MI) de 400 V, 60 Hz 2 pares de polos es alimentado por un variador de frecuencia (V/f), el cual funciona manteniendo la relación tensión/frecuencia constante.

El motor de inducción (MI) tiene acoplado a su eje una máquina síncrona la cual se encuentra conectada a una red de 50 Hz y potencia infinita.

Se pide:

- 1) Se ajusta la frecuencia del variador (V/f) en un valor de 50 Hz y se mide un consumo del motor siendo este 37 A y 3 kW. Determine el mejor modelo del motor con los datos que disponibles indicando el rango de validez de este modelo.
- 2) Se ajusta la frecuencia de V/f en 52 Hz. Determinar la excitación de la máquina síncrona de forma que la misma funcione a mínima corriente de armadura.
- 3) Asumiendo que las pérdidas de vacío en MI se mantienen constantes ¿es admisible para la máquina el funcionamiento según (2)? Justifique su respuesta para que la misma sea considerada.

Datos

MI: 400 V, 60 Hz, 75 kW, 2 pares de polos, velocidad nominal 1746 rpm.

MS: 400 V, 50 Hz, 90 kVA, 2 pares de polos, $X_s = 20\%$, $E = 100.i$ (a 50 Hz) de línea.

No considerar pérdidas mecánicas en ninguna de las máquinas.

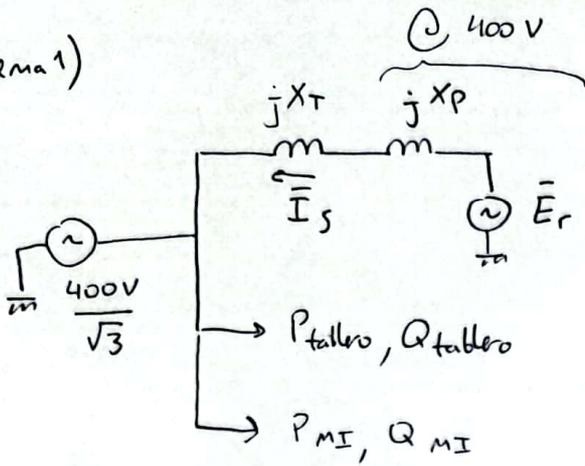
Red: 400 V, 50 Hz.

Teórico (7,5 puntos del curso, todas las preguntas valen lo mismo)

- 1) Considere una MS la cual inicialmente está operando en régimen como generador, operando con un ángulo interno de 18° . A raíz de un fallo en el sistema de excitación de la máquina, se produce una reducción súbita de la corriente de campo a un 70% del valor original. Muestre en un gráfico temporal la evolución de las siguientes variables y explique brevemente lo que sucede en ese transitorio:
 - ángulo interno
 - velocidad del rotor
- 2) Explique la dependencia de la curva par velocidad de un MI de jaula de ardilla con las siguientes variables:
 - Frecuencia de la red
 - Tensión de la red
 - Resistencia de la jaula

Problema 1)

1)



$$X_{T @ 400V} = 0,05 \cdot \frac{0,4^2}{0,5} = 16 \text{ m}\Omega$$

$$X_{P @ 400V} = 44,26 \cdot \left(\frac{400}{6300}\right)^2 = 178 \text{ m}\Omega$$

$$\text{ctes. } \begin{cases} P_{\text{tablero}} = 150 \cdot 0,8 = 120 \text{ kW} \\ Q_{\text{tablero}} = 150 \cdot \sin(\arccos(0,8)) = 90 \text{ kVAR} \end{cases}$$

MI en vacío : $P_{MI} = 0$

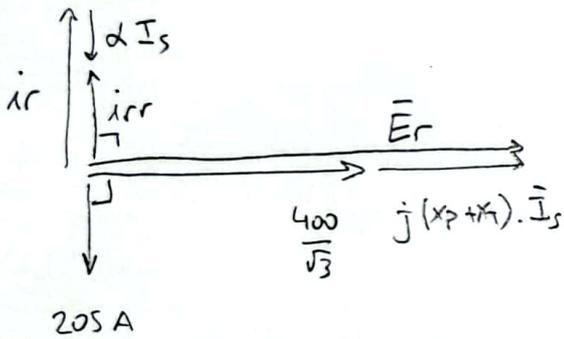
$$Q_{MI} = \sqrt{3} \cdot 400 \cdot 75 = 520 \text{ kVAR}$$

FP visto por la red deber ser 1
MS opera compensando Q exclusivamente

$$\begin{cases} Q_{MS} = Q_{\text{tablero}} + Q_{MI} & Q_{\text{red}} = 0 \\ P_{MS} = 0 & P_{\text{red}} = P_{\text{tablero}} \end{cases}$$

$$\rightarrow Q_{MS} = 90 + 52 = 142 \text{ kVAR} \rightarrow |\bar{I}_s| = \frac{142 \text{ kVAR}}{\sqrt{3} \cdot 400V} = 205,0 \text{ A } (@ 400V)$$

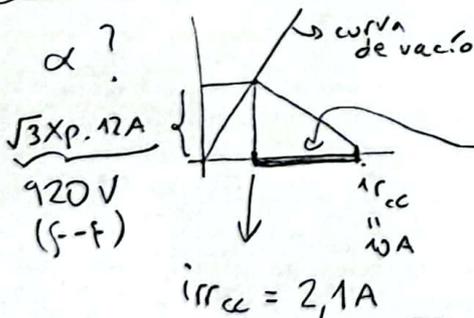
Considero $X_T + X_P = 194 \text{ m}\Omega$



$$\rightarrow |\bar{E}_r| = \frac{400}{\sqrt{3}} + 194 \text{ m}\Omega \cdot 205 \text{ A} = 270,7 \text{ V}$$

$$E_r @ 6,3 \text{ kV} = 270,7 \cdot \left(\frac{6,3}{0,4}\right) = 4264 \text{ V} \quad (7385 \text{ V f-f})$$

curva vacío $i_{rr} = 24,2 \text{ A}$ (interpdo)



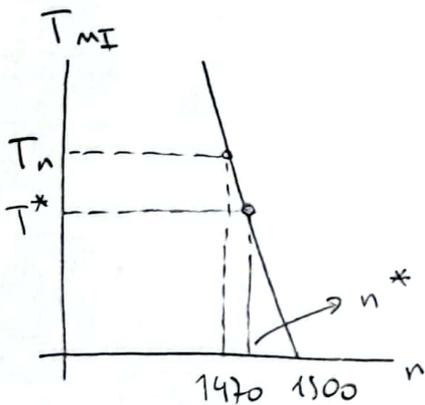
$$\alpha I_{cc} = 10 - 2,1 = 7,9 \text{ A} \rightarrow \alpha = 0,66$$

$$i_{rcc} = 2,1 \text{ A}$$

$$\rightarrow i_r = i_{rr} + \alpha I_s = 24,2 + 0,66 \cdot \frac{13,0 \cdot 205 \cdot 0,4}{6,3} = \boxed{32,8 \text{ A}}$$

2) FP visto por la red debe ser 0,95 ind. } $\rightarrow P_{red} = P_{tablero} = 120 \text{ kW}$
 $P_{MS} = P_{MI}$ } $\rightarrow Q_{red} = 120 \cdot \text{tg}(\arccos 0,95)$
 $= 39,4 \text{ kVAR}$

$Q_{red} = Q_{tablero} + Q_{MI} + Q_{MS} \rightarrow Q_{MS} = -102,6 \text{ kVAR}$ (MS entrega Q)
 " 39,4 kVAR " 90 kVAR " 52,0 kVAR
 (silo consume en ranada vacío, m.p.d.)



$T_n = \frac{P_n}{\omega_n} = \frac{150 \text{ kW}}{\frac{1470 \cdot 2\pi}{60}} = 974 \text{ NM}$ (perdida 32,5 Nm/rpm)

$T^* = 770 \text{ NM} \rightarrow n^* = 1476 \text{ rpm} \rightarrow j^* = 0,016$
 ↑
 recta

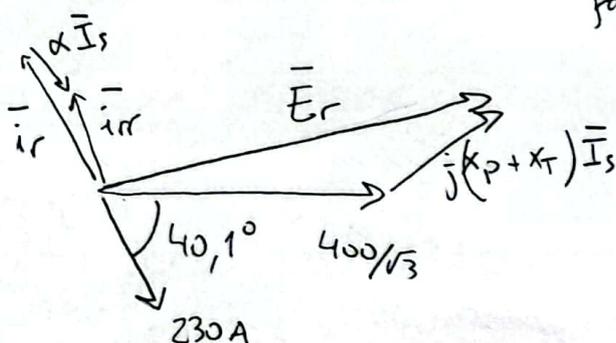
$T = \frac{U^2 g}{R_{ze} \omega_s} \rightarrow R_{ze} = \frac{400^2 \cdot 0,02}{974 \cdot \omega_s} = 0,021 \Omega$

$\rightarrow P_{MI} = 3 \cdot \frac{R_{ze}}{g^*} \cdot \left(\frac{400/\sqrt{3}}{(R_{ze}/g^*)^2} \right)^2 = \frac{400^2 \cdot j^*}{R_{ze}} = 121,9 \text{ kW}$

\rightarrow MS entrega : $P_{MS} = 121,9 \text{ kW}$, $Q_{MS} = 102,6 \text{ kVAR} \rightarrow \varphi = \arctan\left(\frac{Q}{P}\right) = 40,1^\circ$

$\rightarrow |\bar{I}_s| = \frac{\sqrt{121,9^2 + 102,6^2}}{\sqrt{3} \cdot 400 \text{ V}} = 230,0 \text{ A}$

diag. fasorial $\rightarrow \bar{E}_r = 260,0 \text{ V} \angle 7,5^\circ \rightarrow |\bar{E}_r| = 4095 \text{ V}$
 (6,3 kW (7092 f-f))



curra vario : $\bar{I}_{rr} = 21,8 \text{ A} \angle 97,5^\circ$

$\bar{I}_r = \bar{I}_{rr} - \alpha \bar{I}_s \rightarrow \boxed{I_r = 29,6 \text{ A}}$

Problema 2

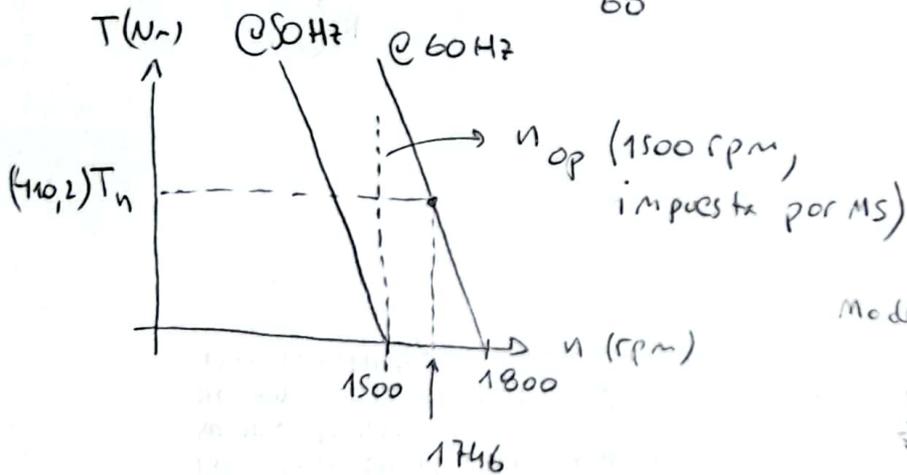
- 1) Al estar mecánicamente acoplado a MS, MI operará siempre a la velocidad de sincronismo de MS (1500 rpm).

El variador de frecuencia opera bajo $\frac{V}{f} = \text{cte}$.

Dado que MI es de 400V, 60Hz, conserva esa proporción.

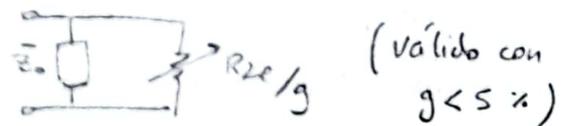
La curva par-velocidad se "traslada" horizontalmente, manteniendo su pendiente:

$$T_{n_{MI}} = \frac{P_{m_{MI}}}{\omega_n} = \frac{75 \text{ kW}}{\frac{1746 \cdot 2\pi}{60}} = 410,2 \text{ Nm} \rightarrow \text{pendiente curva} = \frac{410,2}{1800 - 1746} = 7,6 \frac{\text{Nm}}{\text{rpm}}$$



$$g_n = \frac{1800 - 1746}{1800} = 0,03$$

Modelo de pequeño deslizamiento:



Operando alimentado a 50 Hz, MI está en vacío (ya que $n = 1500$ rpm).
Lo que se mide entonces es impedancia de vacío:

$$\left. \begin{array}{l} I = 37 \text{ A} \\ P = 3 \text{ kW} \\ U = 400 \text{ V} \cdot \frac{50}{60} = 333,3 \text{ V} \\ \uparrow \\ V/f = \text{cte.} \end{array} \right\} \rightarrow \bar{Z}_0 = \frac{333,3}{\sqrt{3} \cdot 37} \angle \arccos\left(\frac{3 \text{ kW}}{\sqrt{3} \cdot 333,3 \cdot 37}\right)$$

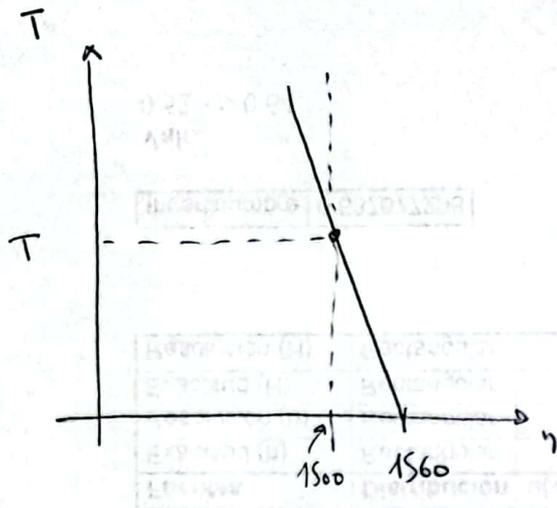
$$\boxed{\bar{Z}_0 = 5,2 \Omega \angle 81,9^\circ}$$

La curva par-velocidad usando m.p.d. es: $T = \frac{U^2 \cdot g}{R_{ze} \omega_s}$

$$\rightarrow R_{ze} = \frac{400^2 \cdot 0,03}{\frac{1800 \cdot 2\pi}{60} \cdot 410,2} = \boxed{0,062 \Omega}$$

2) Ahora $f = 52 \text{ Hz}$ ($V = 400 \cdot \frac{52}{60} = 346,7 \text{ V}$)

n sigue siendo 1500 rpm (ms)



$$n_s = \frac{52 \cdot 60}{2} = 1560 \text{ rpm}$$

$$g = \frac{1560 - 1500}{1500} = 0,04$$

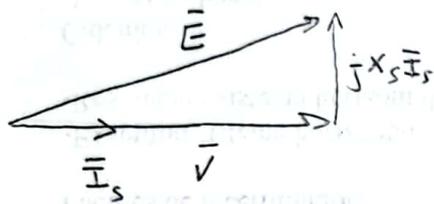
$$T = 7,6 \frac{\text{Nm}}{\text{rpm}} \cdot 60 = 456 \text{ Nm}$$

↑
pendiente
cte.

$$\rightarrow P_m = T \cdot \omega = 456 \cdot \frac{1500 \cdot 2\pi}{60} = 71628 \text{ W} \stackrel{\uparrow}{=} P_{ms}$$

(no hay pérdidas)

MS opera conectada a la red de 400V, 50Hz, ideal:



(operación a mínima corriente de armadura:
 $Q = 0$)

$$X_s = 0,2 \cdot \frac{400^2}{90000} = 0,36 \Omega$$

$$P = \sqrt{3} |V| |I| \cos \varphi \rightarrow |I| = 103,4 \text{ A} \rightarrow |E| = \sqrt{\left(\frac{400}{\sqrt{3}}\right)^2 + (103,4 \cdot 0,36)^2}$$

$$= 233,9 \text{ V}$$

$$\rightarrow i_{exc} = \frac{233,9 \cdot \sqrt{3}}{100} = \boxed{4,05 \text{ A}}$$

3) Las pérdidas en MI son \rightarrow Joule ($R I^2$) \rightarrow debo compararlas con las nominales

vacío (asumo cte.)

Pto. nominal: $I_{ze} = \frac{400}{\sqrt{3} R_{ze/gn}} = 111,7 \text{ A}$

Pto. operación: $I_{ze}^* = \frac{346,7 \text{ V}}{\sqrt{3} R_{ze/g^*}} = 129,1 \text{ A}$

Se incrementan las pérdidas joule en $\left(\frac{129,1}{111,7}\right)^2 = 1,34$

↑

(Si bien baja la tensión, sube g) Sobrecarga!