Ingeniería Eléctrica
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS
UNIVERSIDAD DE CHILE

EL4001 – Conversión de la Energía y Sistemas Eléctricos

Pauta Pregunta 2 – Examen 2010/01

Parte a)

Trabajando en p.u. S_B = 160 MVA, V_B = 15 kV, X_S = 1 p.u.

- Punto de operación (fp en adelanto)

$$P = 144 \text{ MW} = 144/160 \text{ p.u.} = 0.9 \text{ p.u.}$$

$$Q = - P \, tg (\cos^{-1} fp) = - 0.9 \, tg (\cos^{-1} 0.99) = - 0.1282 \text{ p.u.}$$

- Límite de calentamiento de estator

$$P^2 + Q^2 = 1 \qquad (1)$$

- Límite de calentamiento de rotor (E_{max})

$$P^2 + \left(Q + \frac{V^2}{X_S}\right)^2 = \left(\frac{VE_{max}}{X_S}\right)^2 \quad \rightarrow \quad P^2 + \left(Q + \frac{1^2}{1.95}\right)^2 = \left(\frac{1 \cdot 2.6}{1.95}\right)^2$$

$$P^2 + (Q + 0.5128)^2 = (1.3333)^2 \qquad (2)$$

- Límite de estabilidad

$$P = \left(Q + \frac{V^2}{X_S}\right) \cdot tg(\delta_{max}) \quad \rightarrow \quad P = \left(Q + \frac{1^2}{1.95}\right) \cdot tg(70°)$$

$$P = (Q + 0.5128) \cdot tg(70°) \qquad (3)$$

- Potencia mínima

$$P = 60 \text{ MW} = 60/160 \text{ p.u.} = 0.375 \text{ p.u.} \qquad (4)$$

Los vértices vienen dados por las intersecciones:

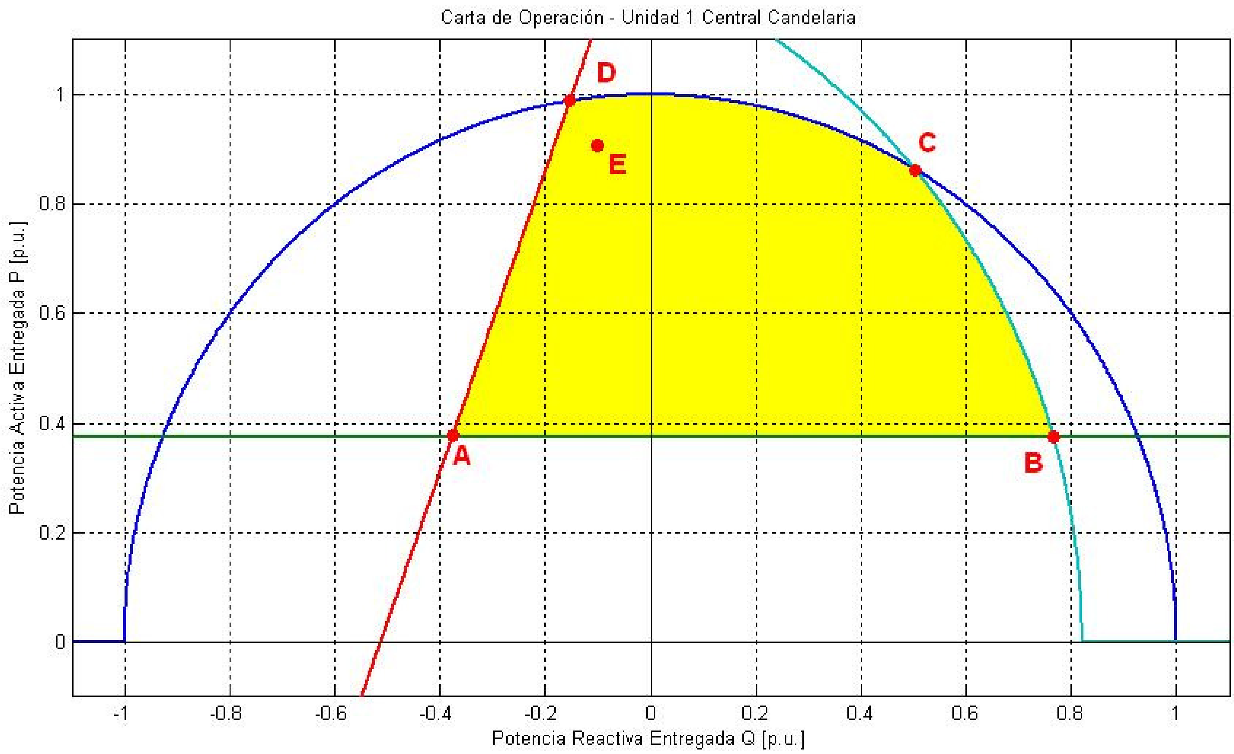
A: (4) y (3) $P_A = 0.3750$
$Q_A = -0.3763$

B: (4) y (2) $P_B = 0.3750$
$Q_B = 0.7667$

C: (1) y (2) $P_C = 0.8649$
$Q_C = 0.5019$

D: (1) y (3) $P_D = 0.9882$
$Q_D = -0.1531$

E: operación $P_E = 0.9000$
$Q_E = -0.1282$



Parte b)

$$P = \frac{V \cdot E \cdot \mathrm{sen}(\delta)}{X} \qquad Q = \frac{V \cdot E \cdot \cos(\delta)}{X} - \frac{V^2}{X} \qquad \rightarrow \qquad P = \left(Q + \frac{V^2}{X}\right) \cdot \tan(\delta)$$

$$\delta = \arctan\left(\frac{P}{Q + \frac{V^2}{X}}\right) = \arctan\left(\frac{0.9}{-0.1282 + \frac{1}{1.95}}\right) = 66.86°$$

$$E = \frac{P \cdot X}{V \cdot \mathrm{sen}(\delta)} = \frac{0.9 \cdot 1.95}{1 \cdot \mathrm{sen}(66.86°)} = 1.9085\,\mathrm{p.u.} = 28.6282\,\mathrm{kV_{ff}}$$

Parte c)

Notamos que el punto de operación tiene una potencia activa superior a la del vértice C, por lo que la corriente de campo variará en un rango tal que la potencia reactiva se mantenga entre el límite de estabilidad y el límite de calentamiento de estator.

$$P = \left(Q + \frac{V^2}{X}\right) \cdot \tan(\delta) \rightarrow \qquad Q = \frac{P}{\tan(\delta)} - \frac{V^2}{X}$$

- En el mínimo, se topará con el límite de estabilidad: $\delta = 70°$

$$Q_{min} = \frac{0.9}{\tan(70°)} - \frac{1^2}{1.95} = -0.1852\,\text{p.u.} = -29.63\,\text{MVAr}$$

$$E_{min} = \frac{P \cdot X}{V \cdot \text{sen}(\delta)} = \frac{0.9 \cdot 1.95}{1 \cdot \text{sen}(70°)} = 1.8676\,\text{p.u.}$$

$$\Delta I\% = \frac{I_f - I_i}{I_i} = \frac{G \cdot \omega \cdot I_f - G \cdot \omega \cdot I_i}{G \cdot \omega \cdot I_i} = \frac{E_f - E_i}{E_i} = \frac{1.8676 - 1.9085}{1.9085} = \text{-2.14\%}$$

- En el máximo, topa con el límite de calentamiento de estator:

$$Q_{max} = \sqrt{1 - 0.9^2} = 0.4359\,\text{p.u.} = 69.74\,\text{MVAr}$$

$$\delta = \arctan\left(\frac{P}{Q + \frac{V^2}{X}}\right) = \arctan\left(\frac{0.9}{0.4359 + \frac{1}{1.95}}\right) = 43.49°$$

$$E_{max} = \frac{P \cdot X}{V \cdot \text{sen}(\delta)} = \frac{0.9 \cdot 1.95}{1 \cdot \text{sen}(43.49°)} = 2.5500\,\text{p.u.}$$

$$\Delta I\% = \frac{I_f - I_i}{I_i} = \frac{G \cdot \omega \cdot I_f - G \cdot \omega \cdot I_i}{G \cdot \omega \cdot I_i} = \frac{E_f - E_i}{E_i} = \frac{2.5500 - 1.9085}{1.9085} = 33.61\%$$

- A mínimo técnico: se mantiene la corriente de campo → E = 1.9085 p.u., P = 0.375 p.u.

$$\delta = \text{arcsen}\left(\frac{P \cdot X}{V \cdot E}\right) = \text{arcsen}\left(\frac{0.375 \cdot 1.95}{1 \cdot 1.9085}\right) = 22.53°$$

$$Q = \frac{V \cdot E \cdot \cos(\delta)}{X} - \frac{V^2}{X} = \frac{1 \cdot 1.9058 \cdot \cos(22.53°)}{1.95} - \frac{1^2}{1.95} = 0.3912\,\text{p.u.} = 62.59\,\text{MVAr}$$