

Problema 1: Considere un generador sincrónico de rotor cilíndrico con las siguientes características en base propia:

$$X_s = 1,2 \text{ [p.u.]}$$

$$X_{d'} = 0,3 \text{ [p.u.]}$$

$$X_{d''} = 0,1 \text{ [p.u.]}$$

$$P_{\text{máx}} = 0,9 \text{ [p.u.]}$$

$$E_{\text{mín}} = 0,32 \text{ [p.u.]}$$

$$E_{\text{máx}} = 1,96 \text{ [p.u.]}$$

$$S_{\text{máx.}} = 100 \text{ [MVA]}$$

$$P_{\text{mín}} = 0$$

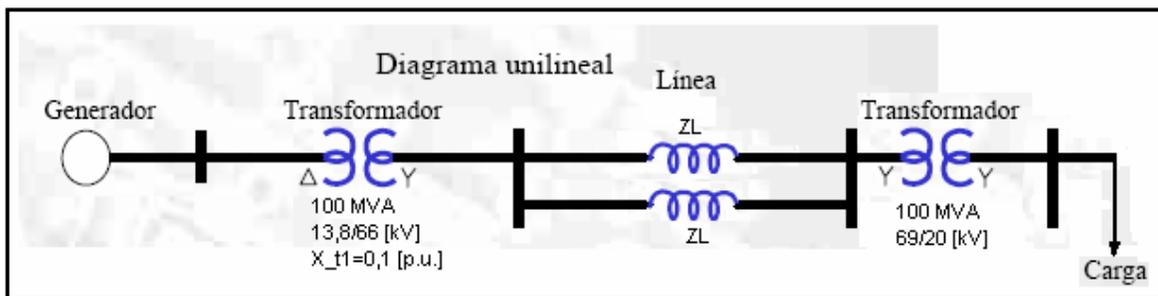
$$V_{\text{nom}} = 13,8 \text{ [kV]}$$

$$\delta_{\text{estab.}} = 70^\circ$$

A) (2) Dibuje la Carta de Operación del generador para una tensión en bornes de 13,8 [kV]. Identifique claramente todos los puntos que definen el área de operación.

B) (2,5) El generador se conecta a un consumo compuesto por 5 motores de $P=18 \text{ MW}$ c/u, con factores de potencia $\cos\phi = 0,95$ inductivo y que operan con un factor de coincidencia $f_{\text{coin}} = 0,8$.

Calcule la regulación de tensión en la barra del consumo, para una condición de demanda máxima, cuando la tensión en ésta es de 18 kV. Para ello considere la siguiente configuración.



$$Z_L = 8 + j12 \text{ [\Omega]}$$

Los ensayos al transformador de bajada:

Vacío: $I_0 = 0,8\%$ $P_0 = 100 \text{ kW}$.

C.C.: $E_{cc} = 8\%$ $P_{cc} = 300 \text{ kW}$

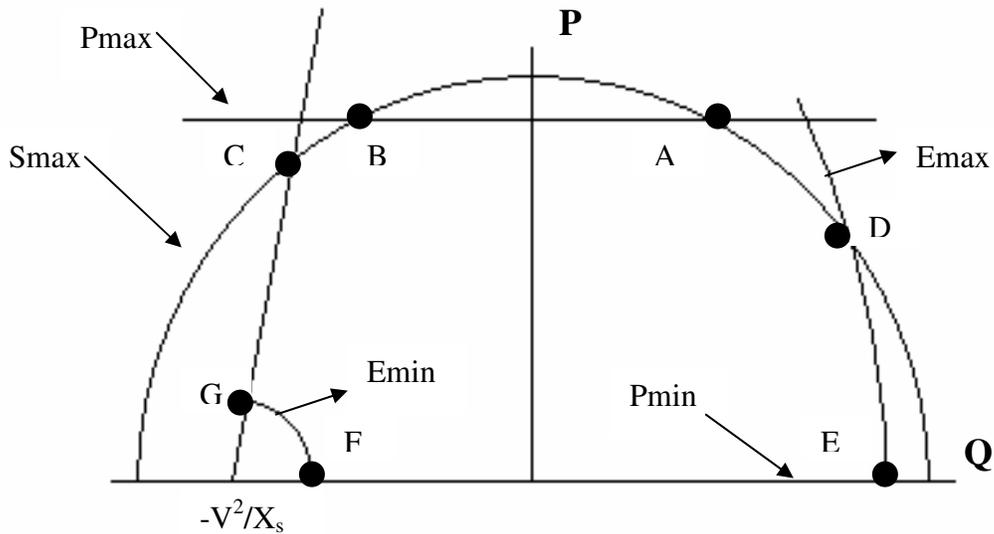
Entregando como resultado una impedancia serie en base propia para el transformador de $Z_T = 0,003 + j0,08$.

Desprecie los efectos de la rama de magnetización.

C) (1,5) Explique cómo varía la carta de operación dibujada en A), para las condiciones de operación calculadas en B). Ubique el punto de operación del generador en la carta y comente la situación desde un punto de vista técnico/económico.

SOLUCION:

A) La carta de Operación tendrá la siguiente forma (también es posible que el segmento definido por Pmax y la recta que define el ángulo crítico se corten dentro del círculo de potencia máxima, pero éste no es el caso como se verá en los cálculos).



Punto A.

$$P^2 + Q^2 = 1$$

$$P = 0.9 \text{ p.u.}$$

$$\Rightarrow Q = 0.43589 \text{ p.u.}$$

$$A = (0.4359, 0.9)$$

Punto B:

por simetría con A queda :

$$B = (-0.4359, 0.9)$$

Punto C:

$$P^2 + Q^2 = 1$$

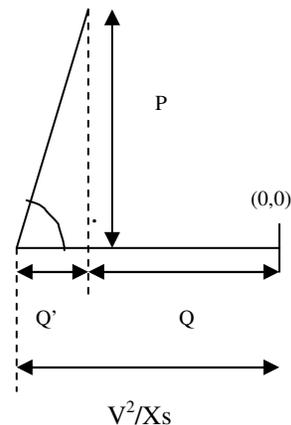
$$\delta = \delta_{\text{critico}} = 70^\circ \Rightarrow \frac{P}{Q'} = \text{Tan}(70^\circ) = 2.74748$$

$$|Q| + |Q'| = \frac{V^2}{X_s} = \frac{1}{1.2}$$

...resolviendo...

$$P = 0.85227 \text{ p.u.} \quad Q = -0.5231 \text{ p.u.}$$

$$C = (-0.5231, 0.85227)$$



Punto D:

$$P^2 + Q^2 = 1$$

$$E = E_{\max} = 1.96 \text{ p.u.}$$

$$P = \frac{E_{\max} \cdot V \cdot \text{sen} \delta}{X_s} = 1.6333 \cdot \text{sen} \delta$$

$$Q = \frac{E_{\max} \cdot V \cdot \text{cos} \delta}{X_s} - \frac{V^2}{X_s} = 1.6333 \cdot \text{cos} \delta - 0.8333$$

reemplazando P y Q en la primera ecuación se tiene :

$$\text{cos} \delta = 0.86775 \Rightarrow \text{sen} \delta = 0.4969$$

$$\Rightarrow P = 0.81175 \text{ p.u.} ; Q = 0.584 \text{ p.u.}$$

$$D = (0.584, 0.81175)$$

Punto E:

$$P = 0$$

$$Q = \frac{E_{\max} \cdot V \cdot \text{cos}(0^\circ)}{X_s} - \frac{V^2}{X_s} = 0.8 \text{ p.u.}$$

$$E = (0.8, 0)$$

Punto F:

$$P = 0$$

$$Q = \frac{E_{\min} \cdot V \cdot \text{cos}(0^\circ)}{X_s} - \frac{V^2}{X_s} = -0.5667 \text{ p.u.}$$

$$E = (-0.5667, 0)$$

Punto G:

$$P = \frac{E_{\min} \cdot V \cdot \text{sen}(70^\circ)}{X_s} = 0.2505$$

$$Q = \frac{E_{\min} \cdot V \cdot \text{cos}(70^\circ)}{X_s} - \frac{V^2}{X_s} = -0.742128$$

$$G = (-0.742128, 0.2505)$$

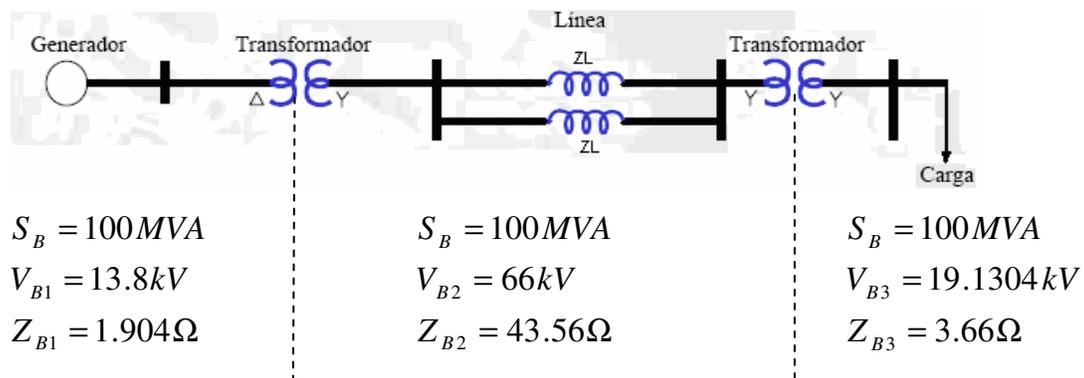
B) Primero se determinará la impedancia del transformador de bajada con los datos de las pruebas:

$$|Z_{T2}| = \frac{|E_{cc}|}{|I_{nom}|} = \frac{0.08}{1} = 0.08 \text{ p.u.}$$

$$R_{T2} = \frac{P_{cc}}{I_{cc}^2} = \frac{0.003}{1} = 0.003 \text{ p.u.}$$

$$\Rightarrow X_{T2} = 0.0799 \text{ p.u.}$$

Antes de empezar se deben definir los valores base para las 3 zonas del sistema:



Luego los valores en p.u. según las bases definidas quedan como sigue:

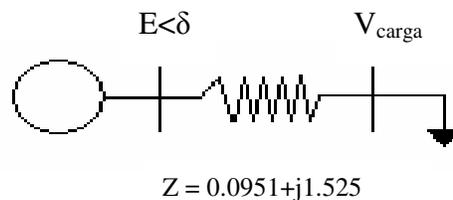
$$X_s = 1.2 \text{ p.u.}$$

$$X_{T1} = 0.1 \text{ p.u.}$$

$$Z_L = \frac{8 + j12}{2 \cdot Z_{B2}} = 0.091827 + j0.13774 \text{ p.u. (los 2 circuitos en paralelo)}$$

$$Z_{T2} = \frac{(0.003 + j0.0799) \cdot \frac{20^2}{100}}{\frac{19.1304^2}{100}} = 0.00328 + j0.08733 \text{ p.u.}$$

El sistema se reduce a lo siguiente:



Se tiene $V_{carga} = 18\text{kV}$, luego $V_{carga} [\text{p.u.}] = 18\text{kV}/19.1304\text{kV} = 0.941[\text{p.u.}]$.

La situación de demanda máxima corresponde a:

$$f_{coin} = \frac{P_{max}}{\sum P_{max_i}} = 0.8, \quad \sum P_{max_i} = 5 \cdot 18\text{MW} \Rightarrow P_{max} = 72\text{MW} = 0.72 \text{ p.u.}$$

$$\cos \varphi = 0.95 \Rightarrow Q_{max} = 23.66\text{MVA} = 0.2367 \text{ p.u.}$$

$$I_{carga} = \left(\frac{S_{carga}}{V_{carga}} \right)^* = \left(\frac{0.72 + j0.2367}{0.941} \right)^* = 0.765143 - j0.251435 \text{ p.u.}$$

Si se toma la barra del consumo como referencia para el ángulo de la tensión se puede escribir la tensión interna del generador (E) como:

$$E = V_{carga} + Z \cdot I_{carga} = 0.941 \angle 0^\circ + (0.0951 + j1.525) \cdot (0.765143 - j0.251435)$$

$$E = 1.80512 \angle 39.28^\circ$$

Como no existen elementos Shunt en el sistema, si se dejara en vacío el extremo de la carga, la tensión en dicha barra sería igual a la tensión interna del generador. De esta forma la regulación se calcula como:

$$\text{Reg} [\%] = \frac{E - V_{carga}}{V_{carga}} \times 100 = \frac{1.80512 - 0.941}{0.941} \times 100 = 91.83\%$$

C) La carta de operación se modificará ya que la tensión en bornes del generador ya no es 1 p.u.

Tensión en bornes:

$$V_{bornes} = V_{carga} + Z_{linea+trafos} \cdot I_{carga} = 0.941 \angle 0^\circ + (0.095153 + j0.32496) \cdot (0.765143 - j0.251435)$$

$$V_{bornes} = 1.1183 \angle 11.59^\circ$$

$$E = 1.80512 \angle 39.28^\circ < E_{max}$$

La carta de operación se modifica de la siguiente forma

- Los límites definidos por P_{max} y P_{min} se mantienen sin variación.
- El semicírculo definido por S_{max} expande su radio linealmente con V_{bornes} (se multiplica por 1.239).
- El centro de las circunferencias que definen E_{max} y E_{min} se mueve a la izquierda según V^2 (se mueve de -0.8333 a -1.28133).
- Los arcos de círculo definidos por E_{max} y E_{min} expanden su radio linealmente con V (se multiplican por 1.239).
- El ángulo crítico no varía.

El ángulo entre la f.e.m. interna del generador y la tensión en bornes será:

$$\delta = \angle E - \angle V_{bornes} = 39.28^\circ - 14.34^\circ = 24.94^\circ$$

Luego las potencias activa y reactiva quedan:

$$P = \frac{E \cdot V \cdot \sin \delta}{X_s} = 0.709341 \text{ p.u.} < P_{max}$$

$$Q = \frac{E \cdot V \cdot \cos \delta}{X_s} - \frac{V^2}{X_s} = 0.483192 \text{ p.u.}$$

Luego el punto de operación queda entre los puntos A y D, dentro de la zona factible de operación.

