

EL57A – Sistemas Eléctricos de Potencia
Pauta Control 1

Pauta por: Lorenzo Reyes

Pregunta 1

1. El diagrama unilineal del problema se presenta en la Figura 1:

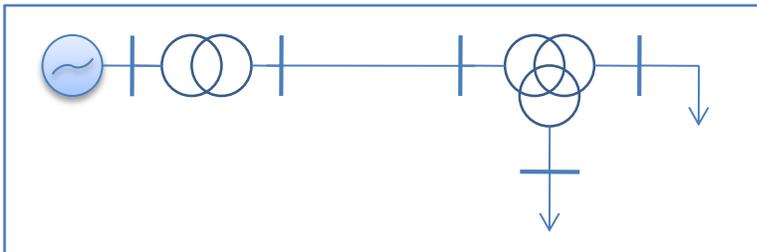


Figura 1: diagrama unilineal

En que existen 4 zonas de distinta tensión: la primera de 13,2[kV] en el lado del generador¹, la segunda de 110[kV] donde está la línea de transmisión, la tercera que está conectada al SIC de 220[kV] y la cuarta a la bajada de la S/E y el pueblo de 66[kV].

Utilizando entonces una potencia base de 100[MVA] los valores base para dejar el sistema en por unidad son:

$$S_B = 100[MVA]$$

$V_{B1} = 13,2[kV]$	$Z_{B1} = 1,7424[\Omega]$
$V_{B2} = 110[kV]$	$Z_{B2} = 121[\Omega]$
$V_{B3} = 220[kV]$	$Z_{B3} = 484[\Omega]$
$V_{B4} = 66[kV]$	$Z_{B4} = 43,56[\Omega]$

De esta forma los valores en por unidad base común de los elementos del sistema son:

$X_d = 0,615[pu]$	$A = 0,988573 + j0,002857[pu]$	$B = 0,008 + j0,032[pu]^2$
$M_f = 0,026[pu]$	$C = -0,000102 + j0,071027[pu]$	$D = A$
$X_{PS} = 0,0444[pu]$	$\Rightarrow X_P = 0,0250[pu]$	$Z_{T1} = j0,0551[pu]$
$X_{PT} = 0,0556[pu]$	$\Rightarrow X_S = 0,0194[pu]$	$Z_{SE} = 96 + j28[pu]$
$X_{ST} = 0,05[pu]$	$\Rightarrow X_T = 0,0306[pu]$	$C_{SIC} = 1,157 + j0,5927[pu]$

El cálculo las impedancias en por unidad base común fue realizado dividiendo el valor en unidades físicas de cada impedancia por la impedancia base de la zona en que se encontraba o multiplicando en caso de admitancia. Para calcular el parámetro en pu base común de aquellos parámetros que fueron dados en pu base propia, como se mantiene el voltaje base pero cambia la potencia base se debe calcular como:

$$Z[pu. bc] = Z[pu. bp] \cdot \frac{S_{BC}}{S_{BP}}$$

¹ Existía un error en el enunciado en que la tensión del lado del generador quedaba en 23[kV], para efectos de pauta se arregló ese problema, pero la corrección se realizó de acuerdo a lo que salía inicialmente.

² Nuevamente, se ha modificado el valor de la impedancia serie solo para efectos de pauta, la revisión se mantiene con la impedancia 10 veces la usada aquí.

En particular, se dice que el consumo de la subestación es de impedancia constante y que en operación nominal consume $C_{SE} = 1[MVA] f.p. = 0,96$ inductivo, por lo tanto la impedancia característica de este consumo es:

$$Z_{SE} = \frac{1^2}{(0,0096 + j0,0028)^*} = 96 + j28[pu]^3$$

Como la impedancia en unidades físicas del transformador 1 está en la delta, y está referido al lado de $110[kV]$, entonces el valor en por unidad es:

$$Z_{T1} = \frac{j20}{3 \cdot 121} = j0,0551[pu]$$

El cálculo de la conexión equivalente estrella del transformador de 3 enrollados, es decir, de las reactancias X_P, X_S y X_T fue calculado como:

$$X_P = \frac{X_{PS} + X_{PT} - X_{ST}}{2} \quad X_S = \frac{X_{PS} - X_{PT} + X_{ST}}{2} \quad X_T = \frac{-X_{PS} + X_{PT} + X_{ST}}{2}$$

2. De esta forma el equivalente monofásico del sistema puede verse en la Figura 2:

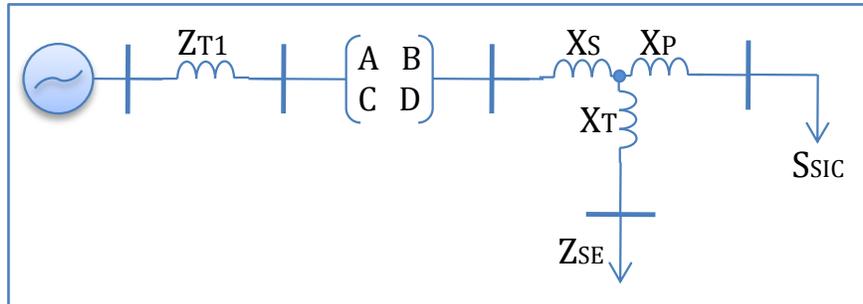


Figura 2: Equivalente monofásico

Debido a que el SIC es un sistema muy grande en comparación al generador del SEP, se considera como una barra infinita y por lo tanto la tensión en esa barra será $1\angle 0^\circ$. De esta forma la corriente que se entrega en la barra del SIC es:

$$I_{SIC} = \left(\frac{S}{V_{SIC}} \right)^* = 1,157 - j0,5927[pu]$$

Así, la tensión en el "neutro"⁴ del modelo equivalente transformador de 3 enrollados es:

$$V_n = jX_P \cdot I_{SIC} + 1 = 1,0152\angle 1,63^\circ[pu]$$

³ Se obtiene de que $S = VI^*, V = ZI \Rightarrow Z = V/I = V \cdot V^*/S^* = |V|^2/S^*$

⁴ Hay que recordar que no es un neutro físico sino un neutro de la conexión equivalente estrella.

Entonces la corriente que se estará entregando a la S/E es:

$$I_{SE} = \frac{V_n}{Z_{SE} + jX_T} = 0,0098 - j0,0026[pu]$$

Y de esa forma la tensión y la corriente en el extremo receptor de la línea de transmisión son:

$$V_2 = jX_S(I_{SIC} + I_{SE}) + V_n = 1,0276\angle 2,87^\circ[pu]$$

$$I_2 = I_{SIC} + I_{SE} = 1,1668 - j0,5953[pu]$$

Utilizando entonces los parámetros ABCD de la línea, la tensión y corriente en el extremo emisor son:

$$\begin{bmatrix} V_1 \\ I_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_2 \\ I_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1,0464\angle 4,74^\circ[pu] \\ 1,1514 - j0,5123[pu] \end{bmatrix}$$

Por lo tanto la tensión en bornes del generador es:

$$V_g = jX_{T1}I_1 + V_1 = 1,0815\angle 7,97^\circ[pu]$$

Y así finalmente el generador estará entregando:

$$S = V_g \cdot I_1^* = 1,1565 + j0,7214[pu]$$

$$\Rightarrow P = 115,65[MW]$$

$$\Rightarrow Q = 72,14[MVAr]$$

Alternativamente es posible resolver el SEP representando todo el sistema en parámetros ABCD

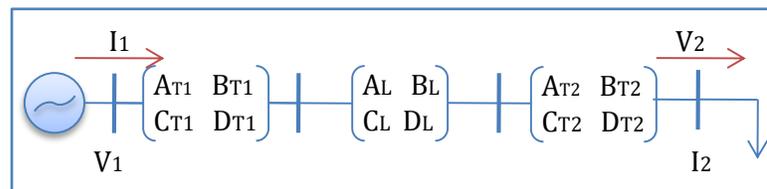


Figura 3: Circuito Equivalente usando parámetros ABCD

La matriz de parámetros ABCD para el caso de una reactancia serie, en por unidad, es:

$$\begin{bmatrix} A_{T1} & B_{T1} \\ C_{T1} & D_{T1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & Z_{T1} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & j0,0551[pu] \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Los parámetros de la línea de transmisión son:

$$\begin{bmatrix} A_L & B_L \\ C_L & D_L \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0,988573 + j0,002857 & 0,008 + j0,032[pu] \\ -0,000102 + j0,071027[pu] & 0,988573 + j0,002857 \end{bmatrix}$$

Y la matriz del transformador trifásico de 3 enrollados, gracias a que el consumo de la subestación es de impedancia constante, es:

$$\begin{bmatrix} A_{T2} & B_{T2} \\ C_{T2} & D_{T2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & Z_S \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ \frac{1}{Z_T + Z_{SE}} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & Z_P \\ 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & j0,0194 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ \frac{1}{96 + j28,0306} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & j0,0250 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Así, la tensión y la corriente en bornes del generador es:

$$\begin{bmatrix} V_g \\ I_g \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{T1} & B_{T1} \\ C_{T1} & D_{T1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A_L & B_L \\ C_L & D_L \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A_{T2} & B_{T2} \\ C_{T2} & D_{T2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \angle 0^\circ [pu] \\ 1,157 - j0,5927 [pu] \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1,0816 \angle 7,97^\circ [pu] \\ 1,1514 - j0,5122 [pu] \end{bmatrix}$$

Que puede comprobarse que es igual a los cálculos realizados anteriormente.

3. La corriente base de la zona del generador es:

$$I_B = \frac{100 [MVA]}{\sqrt{3} \cdot 13,2 [kV]} = 4373,87 [A]$$

Por lo tanto las corrientes límites de campo en por unidad son:

$$I_{cmín} = \frac{200}{4373,87} = 0,0457 [pu]$$

$$I_{cmáx} = \frac{2000}{4373,87} = 0,4573 [pu]$$

De esta forma las tensiones internas en por unidad son:

$$E_{mín} = \frac{\omega M_f I_{cmín}}{\sqrt{2}} = 0,2640 [pu]$$

$$E_{máx} = \frac{\omega M_f I_{cmáx}}{\sqrt{2}} = 2,6395 [pu]$$

Ahora, de la especificación de la Norma Técnica que aparece en el enunciado es posible ver que no hay límite de potencia reactiva ya que el generador está operando en Estado de Alerta (el límite es 100% de la capacidad máxima, es decir 200[MVA]).

Por otro lado la potencia nominal del generador es 2[pu], por lo que la carta de operación tendrá un círculo centrado en 0 de radio 2, dado por la ecuación:

$$P^2 + Q^2 = (V_g I_{máx})^2 = 2^2$$

Además, habrán 2 círculos centrados en $-V^2/X_d = -1,9022 [pu]$ de radios $E_{mín} V/X_d = 0,4642$ y $E_{máx} V/X_d = 4,6421$ respectivamente, dados por la ecuación:

$$P^2 + \left(Q + \frac{V^2}{X_d}\right)^2 = \left(\frac{EV}{X_d}\right)^2$$

Y el último límite está dado por el Límite de Estabilidad Angular, que en este caso está determinado por $\delta_{STAB} = 70^\circ$, en otras palabras, está dado por la ecuación:

$$P = \tan(70^\circ) \left(Q + \frac{V^2}{X_d}\right)$$

La carta de operación se presenta en la Figura 4:

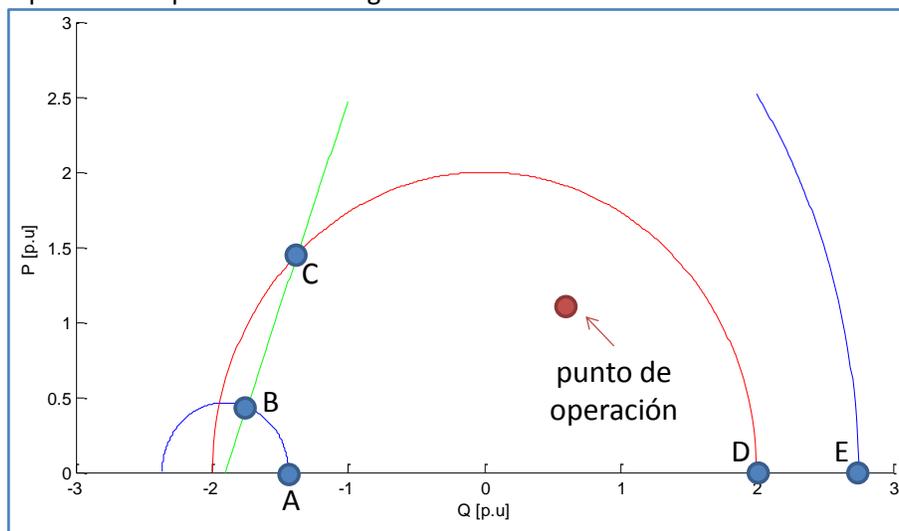


Figura 4: Carta de operación

Coordenadas de puntos importantes ($P; Q$):

A: (0; -1,438) B: (0,4363; -1,7434) C: (1,4544; -1,3729) D: (0; 2) E: (0; 2,74)

Las coordenadas se han calculado igualando las ecuaciones de las curvas que se cruzan para cada punto. Además se ha agregado al dibujo el punto de operación calculado en la parte 2.

Cabe destacar que en general el punto E está más a la izquierda del punto D y que no se consideraron potencias máximas ni mínimas.

El área de operación segura es entonces la que se encuentra dentro de la región ABCD.

4. De la parte 2, como todas las instalaciones de este SEP son menores a 200[kV]:

Barra Generador: 1,0815 Estado de Alerta

Barra AT Transformador: 1,0464 Estado Normal

Fuera de evaluación es posible decir que todas las demás barras están en Estado Normal ya que la línea no entrega reactivos y sólo hay cargas inductivas en el sistema.