

## Problemas

- 3.1** Un generador de rotor cilíndrico suministra  $P_G = 1,0$  con factor de potencia 0,8 en retraso a un nudo de potencia infinita con tensión  $U_a = 1,0$ . Dibujar un diagrama fasorial y calcular  $E_a$  para  $X_S = 1,0$  y  $R = 0$ .
- 3.2** Un generador de rotor liso ( $X_S = 1$ ;  $R = 0,1$ ) está sincronizado a un nudo cuya tensión es  $1 \angle 0^\circ$ . En el momento de la sincronización  $i_E = 1.000$  A. A continuación se modifica la excitación hasta que  $\vec{S}_G = 0,8 + j 0,6$ .
- Hallar  $i_E$  y el rendimiento del generador (suponiendo que el generador no tiene otras pérdidas más que las debidas al efecto Joule en el arrollamiento estatórico).
  - Con la misma  $i_E$ , ¿cuál es la máxima potencia activa que puede suministrar?
- 3.3** Un generador trifásico de 50 MVA, 30 kV, 50 Hz, tiene una reactancia síncrona de  $9 \Omega$  y resistencia despreciable. El generador está suministrando su potencia nominal con factor de potencia 0,8 en retraso y con tensión nominal en sus terminales a un nudo de potencia infinita.
- Determinar la tensión de vacío y el ángulo de potencia  $\delta$ .
  - Manteniendo la excitación constante en el valor hallado en (a), se procede a reducir el par de accionamiento hasta que el generador suministra 25 MW. Determinar la corriente del estátor y el factor de potencia en este caso.
  - Si el generador está funcionando con la excitación del apartado (a), ¿cuál es la máxima potencia que puede suministrar en régimen permanente antes de perder el sincronismo? Hallar también la corriente del estátor correspondiente a esta máxima potencia.
- 3.4** El generador del problema anterior está suministrando 40 MW con una tensión en sus terminales de 30 kV.
- Calcular el ángulo de potencia  $\delta$ , la corriente del estátor y el factor de potencia cuando:
    - La corriente de excitación se reduce al 79,2 % del valor hallado en el problema anterior.

- La corriente de excitación se reduce al 59,27 % del valor hallado en el problema anterior.
- (b) Hallar la mínima excitación por debajo de la cual el generador perderá el sincronismo.
- 3.5** Un alternador trifásico de 318,75 kVA, 2.300 V tiene una resistencia de estátor de  $0,35 \Omega$  por fase y una reactancia síncrona de  $1,2 \Omega$  por fase. Determinar la tensión (línea-línea) generada en vacío y la regulación de tensión  $[(U_{\text{vacío}} - U_{\text{carga}}) / U_{\text{carga}}]$  para:
- (a) Plena carga, factor de potencia 0,8 en retraso, y tensión nominal.
  - (b) Plena carga, factor de potencia 0,6 en retraso, y tensión nominal.
- 3.6** Un generador síncrono trifásico de 60 MVA, 69,3 kV, tiene una reactancia síncrona de  $15 \Omega$  por fase y resistencia de estátor despreciable.
- (a) El generador está suministrando la potencia nominal con factor de potencia 0,8 en retraso, con tensión nominal en terminales, a un nudo de potencia infinita. Determinar el valor de la tensión de vacío por fase  $E_a$  y el ángulo de potencia  $\delta$ .
  - (b) Si la fem generada es de 36 kV, ¿cuál es la máxima potencia trifásica que el generador puede suministrar antes de la pérdida de sincronismo?
  - (c) El generador está suministrando 48 MW a un nudo a la tensión nominal con su corriente de excitación ajustada para una fem generada de 46 kV (fase-neutro). Determinar la corriente de estátor y el factor de potencia.
- 3.7** Un generador síncrono trifásico de 24.000 kVA, 17,32 kV, 50 Hz tiene una reactancia síncrona de  $5 \Omega$  por fase y resistencia de estátor despreciable.
- (a) Para una cierta excitación, el generador está a plena carga, con factor de potencia 0,8 en retraso, y conectado a un nudo de potencia infinita de tensión (línea-línea) 17,32 kV. Determinar la tensión de excitación o de vacío ( $E_a$ ).
  - (b) Manteniendo la tensión de excitación en 13,4 kV (fase-neutro) y la tensión en terminales en 10 kV (fase-neutro), ¿cuál es la máxima potencia activa trifásica que el generador puede desarrollar antes de perder el sincronismo?

- (c) Determinar la corriente del estátor para las condiciones del apartado (b).

**3.8** Un generador síncrono trifásico de rotor cilíndrico de 50 MVA, 10 kV, tiene una reactancia síncrona de 1,65 por unidad y una resistencia de estátor de 0,1 por unidad. La máquina funciona a 10 kV sobre un nudo de potencia infinita, suministrando 2.000 A con factor de potencia 0,9 en adelanto.

- (a) Determinar la tensión de vacío  $E_a$  y el ángulo de potencia  $\delta$  de la máquina. Dibujar el diagrama fasorial correspondiente.
- (b) ¿Cuál es la tensión en terminales a circuito abierto de la máquina para el mismo nivel de excitación?
- (c) ¿Cuál es el valor en régimen permanente de la corriente de cortocircuito con el mismo nivel de excitación?

ÁLVARO BLASCO

# EJERCICIOS CAPÍTULO 3.

1-  $P_G = 1'0$  con  $\phi_{dp} = 0'8$  en retraso. (Inductivo)

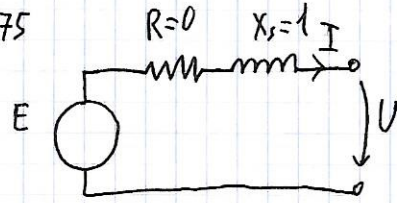
Nudo de potencia infinita con  $U_A = 1'0$

Dibujar diagrama fasorial y calcular  $E_a$  para  $X_s = 1'0$  y  $R = 0$

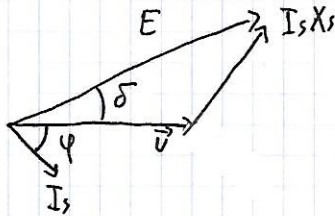
$$q_g = p_g \cdot \tan(\arccos(\phi_{dp})) = 1 \cdot \tan(0'6435) = 0'75$$

$$s_g = p_g + jq_g = 1 + 0'75i$$

$$i_g = \left( \frac{s_g}{v} \right)^* = \left( \frac{1 + 0'75i}{1} \right)^* = 1 - 0'75i$$



$$e_g = v + i_g \cdot x_g = 1 + (1 - 0'75i) \cdot 1i = 1'75 + i \cdot 1 = 2'0156 \angle 0'51915 \text{ pu}$$



ÁLVARO BLASCO

2-

Generador de rotor liso.  $X_s = 1$   $R = 0.1$   $z_g = 0.1 + j \cdot 1 = 1.00498 \angle 1.107$

$$U = 1 \angle 0^\circ$$

Cuando se da la sincronización  $i_E = 1000$  A.

Luego se modifica la excitación hasta que  $\vec{S}_G = 0.8 + j 0.6$

a) Hallar  $i_E$  y el rendimiento del generador.

$$i = \left( \frac{s_g}{v} \right)^* = \left( \frac{0.8 + j 0.6}{1} \right)^* = 0.8 - j 0.6$$

CASO 1  $\rightarrow$  Sincronización.  
CASO 2  $\rightarrow \vec{S}_G = 0.8 + j 0.6$   
CASO 2  $\parallel 1 \angle -0.6435$

$$e_1 = v = 1 \angle 0$$

$$e_2 = v + i \cdot z_g = 1 + (0.8 - j 0.6) \cdot (0.1 + j 1) = 1.68 + 0.74j = 1.8357 \angle 0.4149$$

$$i_{E1} = 1000 \text{ A}$$

$$i_{E2} = i_{E1} \cdot \left| \frac{e_2}{e_1} \right| = 1000 \cdot \frac{1.8357}{1} = 1835.7 \text{ A}$$

$$\eta = \frac{\text{real}(s_g)}{\text{real}(s_g) + |i|^2 \cdot \text{real}(z_g)} = \frac{0.8}{0.8 + 1^2 \cdot 0.1} = 0.8889$$

b) Con la misma  $i_E$ , ¿máxima potencia activa que puede suministrar?

$$\Delta_{\max} = \frac{\pi}{2} \rightarrow 90^\circ \rightarrow \text{Límite de estabilidad es estático.}$$

$$p_{\max} = \frac{|e_2| \cdot |v| \cdot (R \cdot \cos(\Delta_{\max}) + X_s \cdot \sin(\Delta_{\max})) - |v|^2 \cdot R}{|z_g|^2}$$

$$p_{\max} = \frac{1.8357 \cdot 1 \cdot (0.1 \cdot \cos\left(\frac{\pi}{2}\right) + 1 \cdot \sin\left(\frac{\pi}{2}\right)) - 1^2 \cdot 0.1}{1^2 + 0.1^2} = 1.7186$$



3

Generador trifásico  $S = 50 \text{ MVA}$   $U = 30 \text{ KV}$   $f = 50 \text{ Hz}$   $X_s = 9 \Omega$   $R = 0 \Omega$

$\phi_{dp} = 0.8$  en retraso  $\rightarrow$  inductivo.

Tensión nominal en sus terminales conectado a un nudo de potencia infinita.

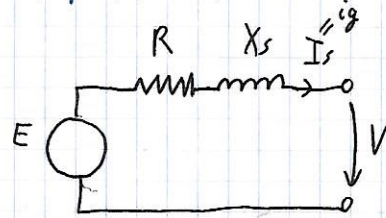
a) Determinar la tensión de vacío y el ángulo de potencia  $\delta$ .

$$S_b = 50 \cdot 10^6 \text{ VA}$$

$$U_b = 30 \cdot 10^3 \text{ V}$$

$$Z_b = \frac{U_b^2}{S_b} = \frac{(30 \cdot 10^3)^2}{50 \cdot 10^6} = 18 \Omega$$

$$I_b = \frac{S_b}{U_b \cdot \sqrt{3}} = \frac{50 \cdot 10^6}{30 \cdot 10^3 \cdot \sqrt{3}} = 962.25$$



$$v = \frac{U}{U_b} = \frac{30 \text{ KV}}{30 \text{ KV}} = 1 \text{ pu}$$

$$s = \frac{S \cdot \phi_{dp} + 1i \cdot S \cdot \sin(\arccos(\phi_{dp}))}{S_b} = \frac{50 \cdot 10^6 \cdot 0.8 + 50 \cdot 10^6 \cdot i \cdot \sin(0.6435)}{50 \cdot 10^6} = 0.8 + 0.6j$$

$$x_s = \frac{X_s}{Z_b} = \frac{9 \Omega}{18 \Omega} = 0.5 \text{ pu} = 0.5i = 0.5 \angle 90^\circ$$

$$i_g = \left( \frac{s}{v} \right)^* = \left( \frac{0.8 + 0.6j}{1} \right)^* = 0.8 - 0.6j$$

$$e = v + i_g \cdot x_s = 1 + (0.8 - 0.6j) \cdot 0.5j = 1.3 + 0.4j = 1.36 \angle 0.2985$$

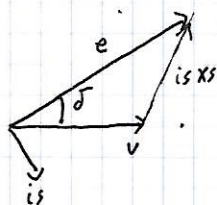
$$E = e \cdot U_b = 1.36 \angle 0.2985 \cdot 30 \text{ KV} = 40.8 \angle 0.2985 \text{ KV}$$

ÁNGULO DE POTENCIA

b) Manteniendo la excitación cte, se reduce T hasta que el generador suministra 25 MW.

is y fdp.

$$p = \frac{25 \cdot 10^6}{50 \cdot 10^6} = 0.5 \text{ pu}$$



$$p = \frac{|E| \cdot |V|}{|X_s|} \cdot \sin \delta \rightarrow \sin \delta = \frac{p \cdot |X_s|}{|E| \cdot |V|}$$

$$\delta = \arcsin \left( \frac{p \cdot |X_s|}{|E| \cdot |V|} \right) = \arcsin \left( \frac{0.5 \cdot 0.5}{1.36 \cdot 1} \right) = 0.1849$$

$$q = \frac{|E| \cdot |V| \cdot \cos(\delta)}{|X_s|} - \frac{|V|^2}{|X_s|} = \frac{1.36 \cdot 1 \cdot \cos(0.1849)}{0.5} - \frac{1^2}{0.5} = 0.6736$$

$$s_g = p + qi = 0.5 + 0.6736j$$

$$i_g = \left( \frac{s_g}{V} \right)^* = \left( \frac{0.5 + 0.6736j}{1} \right)^* = 0.5 - 0.6736j = 0.8389 \angle -0.9323$$

$$I_g = i_g \cdot I_b = 0.8389 \angle -0.9323 \cdot 962.25 = 807.23 \angle -0.9323 \text{ A}$$

$$f_{dp} = \cos(\delta) = \cos(-0.9323) = 0.59599 \text{ (inductivo)}$$

c) Excitación del a).

$\delta = 90^\circ \rightarrow$  sincronismo

Máxima potencia que puede suministrar en rp sin perder el sincronismo?  $i_g$ ?

$$p_{\max} = \frac{|E| \cdot |V|}{|X_s|} \cdot \sin \left( \frac{\pi}{2} \right) = \frac{1.36 \cdot 1}{0.5} = 2.72 \text{ pu}$$

$$P_{\max} = p_{\max} \cdot S_b = 2.72 \cdot 50 \text{ MVA} = 136 \text{ MW}$$

$$q_{\max} = \frac{|E| \cdot |V| \cdot \cos \left( \frac{\pi}{2} \right)}{|X_s|} - \frac{|V|^2}{|X_s|} = \frac{1^2}{0.5} = 2 \text{ pu}$$

$$s_{\max} = p_{\max} + jq_{\max} = 2.72 + 2j$$

$$i_{\max} = \left( \frac{s_{\max}}{V} \right)^* = \left( \frac{2.72 + 2j}{1} \right)^* = 2.72 - 2j \text{ pu}$$

$$I_{\max} = i_{\max} \cdot I_b = (2.72 - 2j) \cdot 962.25 = 3248.7 \angle -0.634 \text{ A}$$



4 Generador del ejercicio anterior.  $P=40\text{MW}$   $V=30\text{KV}$

a) Calcular  $\delta$ ,  $I_G$  y  $\text{fdp}$  si:

•  $e' = 0'792e \rightarrow \text{Modo 1}$

$$P = \frac{40\text{MW}}{50\text{MVA}} = 0'8$$

•  $e'' = 0'5927e \rightarrow \text{Modo 2}$

$$e' = 0'792e = 0'792 \cdot (1'3 + 0'4j) = 1'0772 + 0'2985j$$

$$\delta' = \arcsin\left(\frac{P \cdot |x_s|}{|e'| \cdot V}\right) = \arcsin\left(\frac{0'8 \cdot 0'5}{1'0772 \cdot 1}\right) = 0'3804$$

→ Se recalcula porque tiene distinta  $P$ .

$$e_g = e' \cdot \cos(\delta') + e' \cdot \sin(\delta') \cdot j = 1'0772 \cdot \cos(0'3804) + 1'0772 \cdot \sin(0'3804)j =$$

$$e_g = 1'0002 + 0'4j$$

$$i_g = \frac{e_g - v_g}{x_g} = \frac{1'0002 + 0'4j - 1}{0'5j} = 0'8 - 0'0004j \text{ pu}$$

$$I_{G1} = (0'8 - 0'0004j) \cdot 962'25 = 769'81 - 5 \text{ A}$$

$$\text{fdp}_{G1} = \cos(-5) = 0'2837 \text{ inductivo} \rightarrow \text{Matlab interpreta que } \approx 0 \text{ y por tanto } \cos(0) = 1$$

Para el caso 2 exactamente igual.

b) Mínima excitación para que no se pierda el sincronismo.

$$e = \frac{P_g \cdot x_g}{V \cdot \sin \delta_{\max}} = \frac{0'8 \cdot 0'5}{1 \cdot \sin\left(\frac{\pi}{2}\right)} = 0'4$$

$$|i_{ex}| = i_0 \cdot \frac{|e|}{|e_0|} = \frac{0'4}{1'36} = 0'2941 \cdot i_0 \rightarrow 29'41\% \text{ la inicial}$$



5- Alternador trifásico 318'75 KVA, 2300V  $R=0'35\Omega$   $X_s=1'2\Omega$

$V_L$  en vacío y la regulación de tensión  $\frac{V_{vacío} - V_{CARGA}}{V_{CARGA}}$  para:

a) Plena carga,  $\cos\phi = 0'8$  en retraso  $\rightarrow$  ind y tensión nominal.

$$S_b = 318'75 \text{ KVA} \quad s=1$$

$$V_b = 2300 \text{ V} \quad u=1$$

$$Z_b = \frac{V_b^2}{S_b} = \frac{2300^2}{318'75 \cdot 10^3} = 16'596 \Omega$$

$$z = \frac{0'35 + 1'2j}{16'596} = 0'021 + 0'0723j$$

$$s_1 = s \cdot \cos(\phi_{ind}) + s \cdot \sin(\phi_{ind})j = 1 \cdot 0'8 + 1 \cdot \sin(0'6967)j = 0'8 + 0'6j \text{ pu}$$

$$i_1 = \left( \frac{s_1}{u} \right)^* = \left( \frac{0'8 + 0'6j}{1} \right)^* = 0'8 - 0'6j \text{ pu}$$

$$e_1 = u + i_1 \cdot z = 1 + (0'8 - 0'6j) \cdot (0'021 + 0'0723j) = 1'06018 + 0'04524j = 1'0611 + 0'0426j$$

$$E_1 = e_1 \cdot V_b = 1'0611 + 0'0426j \cdot 2300 = 2440'63 + 0'0426j \text{ V}$$

Lo mismo para 0'6 en adelanto.

$$\text{regulación} = \frac{|e_1| - u}{u} = \frac{1'0611 - 1}{1} = 0'0611 \rightarrow 6'11\%$$

Lo mismo para 0'6 en adelanto. Sale negativo.

6 Generador síncrono trifásico de 60 MVA, 69'3 KV.

$$X_s = 15 \Omega \quad R_s = 0.$$

a) Potencia nominal con 0'8 en retraso. Tensión nominal a nudo de potencia infinita.

$E_a$  (fase-neutro) y ángulo de potencia  $\delta$ .

$$S_b = 60 \text{ MVA} \quad s = 1$$

$$U_b = 69'3 \text{ KV} \quad v = 1$$

$$Z_b = \frac{U_b^2}{S_b} = \frac{(69'3 \cdot 10^3)^2}{60 \cdot 10^6} = 80'04 \Omega$$

$$I_b = \frac{\frac{S_b}{3}}{\frac{U_b}{\sqrt{3}}} = \frac{S_b \cdot \sqrt{3}}{U_b \cdot 3} = \frac{S_b}{U_b \cdot \sqrt{3}} = \frac{60 \cdot 10^6}{69'3 \cdot 10^3 \sqrt{3}} = 499'87 \text{ A}$$

$$z = \frac{15 \Omega}{80'04 \Omega} = 0'1874 \text{ pu}$$

$$s_1 = s \cdot \cos(\phi) + s \cdot \sin(\phi)j = 1 \cdot 0'8 + 1 \cdot \sin(0'6435)j = 0'8 + 0'6j$$

$$ig = \left( \frac{s_1}{v} \right)^* = \left( \frac{0'8 + 0'6j}{1} \right)^* = 0'8 - 0'6j$$

$$e = v + ig \cdot z = 1 + (0'8 - 0'6j) \cdot 0'1874j = 1'1124 + 0'1124j \text{ pu} = 1'1225 \angle 0'1340$$

$$E = e \cdot U_b = 1'1225 \angle 0'1340 \cdot 69'3 \text{ KV} = 77'789 \angle 0'1340 \text{ KV} \rightarrow \text{Entre fases}$$

$$E = \frac{77'789 \text{ KV}}{\sqrt{3}} = 44'509 \text{ KV fase-neutro}$$

$$\delta = 0'1340$$

b) Si  $g_{em} = 36 \text{ KV}$  (fase neutro)  $\rightarrow$  Entre líneas. Máx potencia sin perder sincronismo?

$$e_2 = \frac{36 \cdot 10^3 \cdot \sqrt{3}}{U_b} = \frac{36 \cdot 10^3 \cdot \sqrt{3}}{69'3 \cdot 10^3} = 0'8998 \text{ pu}$$

$$p_{\max} = \frac{|e_2| \cdot |v|}{|z|} \cdot \sin\left(\frac{\pi}{2}\right) = \frac{0'8998 \cdot 1}{0'1874} = 4'8015 \text{ pu}$$

$$P_{\max} = p_{\max} \cdot S_b = 4'8015 \cdot 60 \text{ MVA} = 288'08 \text{ MW}$$



c) Suministra 48MW con e ajustada a  $E=46\text{KV}$  (fase-neutro).  $i_g$  y  $gdp$ ?

$$p = \frac{48 \cdot 10^6}{60 \cdot 10^6} = 0'8 \text{ pu}$$

Entre líneas.

$$e_3 = \frac{46 \cdot 10^3 \cdot \sqrt{3}}{69'3 \cdot 10^3} = 1'1497 \text{ pu}$$

$$\delta_3 = \arcsin \left( \frac{p \cdot |z|}{|e_3| \cdot |v|} \right) = \arcsin \left( \frac{0'8 \cdot 0'1874}{1'1497 \cdot 1} \right) = 0'1308$$

$$q = \frac{|e| \cdot |v|}{|z|} \cdot \cos |\delta_3| - \frac{|v|^2}{|z|} = \frac{1'1497 \cdot 1}{0'1874} \cdot \cos(0'1308) - \frac{1^2}{0'1874} = 0'7464$$

$$s = p + jq = 0'8 + 0'7464j$$

$$i = \left( \frac{s}{v} \right)^* = \left( \frac{0'8 + 0'7464j}{1} \right)^* = 0'8 - 0'7464j$$

$$I = i \cdot I_b = (0'8 + 0'7464j) \cdot 499'87 = 546'921 \angle 0'7508 \text{ A}$$

$$gdp = \cos(0'7508) = 0'7311 \text{ inductivo (Ángulo positivo)}$$