

## Primeira Questão:

No gerador síncrono, um campo magnético é produzido no rotor. Este campo magnético é obtido a partir de um ímã permanente ou eletroímã, que é criado pela aplicação de uma corrente CC a um enrolamento desse rotor. O acionamento do rotor se dá por uma máquina motriz primária, produzindo um campo girante dentro da máquina, induzindo um conjunto de tensões trifásicas nos enrolamentos do estator do gerador.

Nos enrolamentos de armadura é onde é induzida a tensão principal e os enrolamentos de campo produzem o campo magnético principal da máquina.

O rotor de um gerador síncrono é essencialmente um grande eletroímã. Os polos magnéticos do rotor podem ser construídos de duas formas: salientes ou não salientes. Um polo não saliente é um polo magnético com os enrolamentos encastados e nivelados com a superfície do rotor, já um polo saliente é um polo magnético que se sobressai radialmente do rotor.

O rotor é construído com lâminas delgadas para reduzir as perdas por correntes parasitas uma vez que ele está sujeito a campos magnéticos variáveis.

Pode-se fornecer potência cc de duas formas. Uma delas é fornecendo potência cc a partir de uma fonte de potência cc especial, montada diretamente no eixo do gerador síncrono e a outra forma utiliza uma fonte cc para fornecer potência cc para o rotor por meio de escovas e anéis coletores.

A operação de um motor é dada pelo seguinte conceito básico: a corrente  $I_A$  do motor produz um campo magnético  $B_A$  em regime permanente. Um conjunto trifásico de tensões é aplicado da máquina produzindo um fluxo trifásico de correntes nos enrolamentos.

Um conjunto trifásico de correntes nos enrolamentos produz um campo magnético uniforme grande  $B_S$ . Assim, há dois campos magnéticos presentes na máquina e o campo do rotor tenderá a se alinhar com o campo do estator.

O conjugado no rotor da máquina será maior quanto maior for o ângulo entre os dois campos magnéticos.

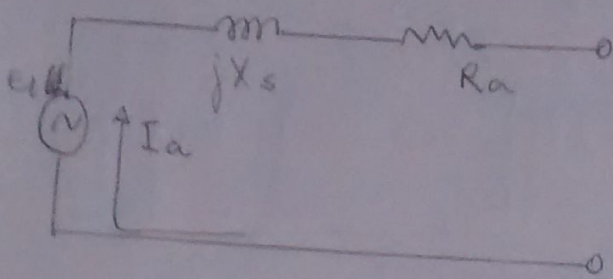
A velocidade de rotação é dada por  $\omega = \frac{120f}{p}$ , onde  $p$  é o número de polos.

Máquinas de polos não salientes são utilizadas onde se necessita velocidades altas, visto que estas possuem 2 e 4 polos. Agora, como as máquinas de polos salientes possuem 4 ou mais polos, são usadas em aplicações com velocidades baixas.



## Segunda Questão:

O circuito equivalente por fase de um gerador síncrono é:



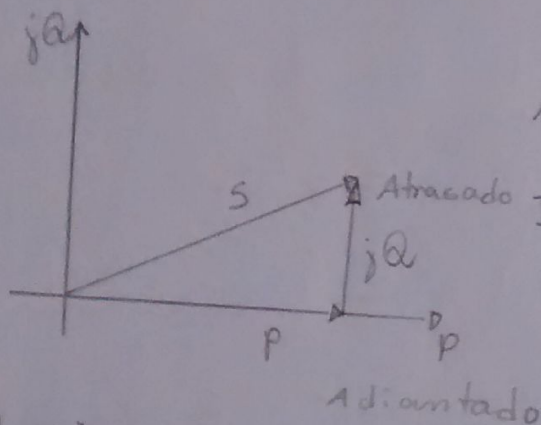
A potência por fase  $V_t \angle 0^\circ$  é dada por:

$$S = V_t \cdot I_a^* \quad (1)$$

$$Z_s = R_a + jX_s = |Z_s| \angle \theta_s$$

O conjugado de  $I_a$  é considerado de acordo com a convenção:

→ Potência reativa atrasada é considerada positiva e potência reativa adiantada, é considerada negativa



A partir desta consideração:

$$I_a^* = \left| \frac{E_f - V_t}{Z_s} \right|^* = \frac{E_f^*}{Z_s^*} - \frac{V_t^*}{Z_s^*}$$

$$= \frac{|E_f| \angle -\delta}{|Z_s| \angle -\theta_s} - \frac{V_t \angle 0^\circ}{|Z_s| \angle -\theta_s} = \frac{|E_f|}{|Z_s|} \angle \theta_s - \delta - \frac{|V_t|}{|Z_s|} \angle \theta_s \quad (2)$$

Agora substituindo (2) em (1), tem-se:

$$S = \frac{|V_t| \cdot |E_t| \angle \theta_s - \delta}{|Z_s|} - \frac{|V_t|^2 \angle \theta_s}{|Z_s|} \quad \text{VA/fase}$$

Daí tem-se a potência ativa  $P$  e a potência reativa  $Q$ .

$$P = \frac{|V_t| |E_f|}{|Z_s|} \cos(\theta_s - \delta) = \frac{|V_t|^2}{|Z_s|} \cos(\theta_s) \text{ W/fase}$$

$$P_{3\phi} = \frac{3 |V_t| |E_f|}{|Z_s|} \cos(\theta_s - \delta) = 3 \frac{|V_t|^2}{|Z_s|} \cos(\theta_s) \text{ W} \quad (3)$$

$$Q = \frac{|V_t| |E_f|}{|Z_s|} \sin(\theta_s - \delta) = \frac{|V_t|^2}{|Z_s|} \sin(\theta_s) \text{ VAR/fase}$$

$$Q_{3\phi} = \frac{3 |V_t| |E_f|}{|Z_s|} \sin(\theta_s - \delta) = 3 \frac{|V_t|^2}{|Z_s|} \sin(\theta_s) \text{ VAR} \quad (4)$$

Para o caso onde  $R_s$  pode ser desprezado, tem-se  $Z_s = X_s$  e  $\theta_s = 90^\circ$

Utilizando as equações (3) e (4):

$$P_{3\phi} = \frac{3 |V_t| \cdot |E_f|}{|X_s|} \cdot \sin \delta \text{ W} \quad \begin{aligned} &\cdot \cos(90^\circ - \delta) = \sin \delta \\ &\cdot \sin(90^\circ - \delta) = \cos \delta \end{aligned}$$

$$Q_{3\phi} = \frac{3 |V_t| |E_f|}{|X_s|} \cos \delta = 3 \frac{|V_t|^2}{|X_s|} \text{ VAR}$$



### Terceira Questão:

Para se conectar um gerador síncrono em paralelo com outros geradores e/ou com o barramento infinito algumas condições devem ser atendidas. A primeira delas diz respeito às tensões eficazes de linha dos dois geradores, que devem possuir o mesmo valor eficaz. Se as tensões não forem exatamente as mesmas em cada condutor que está sendo conectado, haverá fluxo muito grande de corrente ao se conectar o gerador, danificando as máquinas.

A segunda condição diz respeito à sequência das fases, que deve ser a mesma para os dois geradores. Se essa sequência for diferente, então, mesmo que um par de tensões esteja em fase, os outros dois pares de tensão estarão defasados de  $120^\circ$  graus. Dessa forma, correntes muito elevadas irão circular nas fases que estiverem com defasagem, danificando as máquinas. Para corrigir tal problema, basta inverter as ligações de duas fases de uma das máquinas.

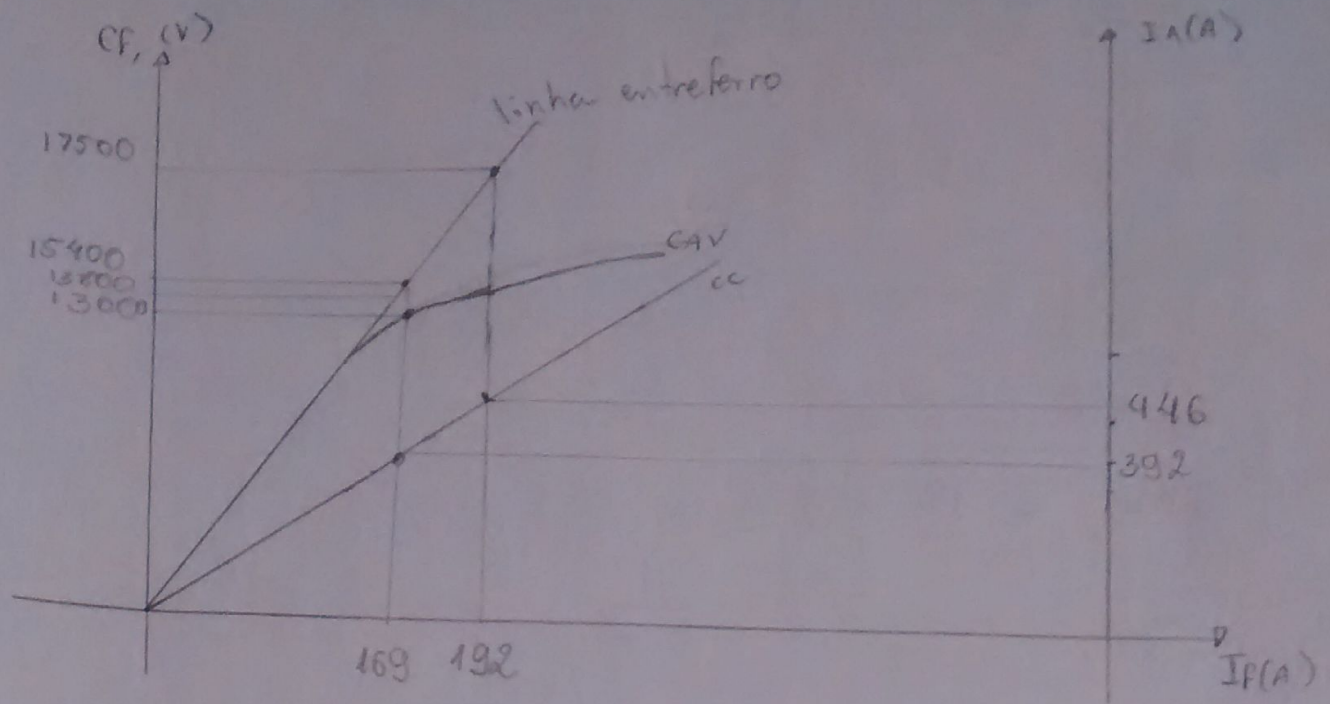
A terceira condição está relacionada com os ângulos das duas fases  $\alpha$ , que devem ser iguais para garantir que as tensões com mesmo valor de tensão eficaz sejam completamente idênticas em todos os instantes.

A quarta condição afirma que a frequência do novo gerador deve ser ligeiramente superior à frequência do sistema que já está em operação. Se as

Frequências dos geradores não estiverem muito próximas uma da outra quando os geradores são ligados entre si, ocorrerão grandes transitórios de potência até que os geradores se estabilizem em uma frequência comum. As frequências das duas máquinas devem ser muito próximas, mas não exatamente iguais. Elas devem diferir em um pequeno valor, de modo que o ângulo de fase da máquina que está entrando em paralelo mude lentamente em relação ao ângulo de fase do sistema já em operação. Desse modo, pode-se observar que o ângulo entre as tensões e finalmente conectar os geradores em paralelo quando os sistemas estiverem exatamente em fase.



## Quarta Questão:



Condições nominais : 9375 KVA, 13800V, 2 polos, 60Hz, y.

Impedância da carga : Indutiva ou Capacitiva

Resistência de armadura : 0,064  $\Omega$ /fase

Reatância de dispersão : 0,1 pu  $\rightarrow$  2,03136  $\Omega$ /fase

$$Z_b = \frac{(V_b)^2}{S_b} = \frac{(13800)^2}{9375 \cdot 10^3} = 20,3136$$

a)  $\chi_{sincrona \text{ n}^\circ \text{ saturada}}$  Ensaio 1  $= \frac{15400/\sqrt{3}}{392} = 22,68 \Omega$ ;

$\chi_{sincrona \text{ n}^\circ \text{ saturada}}$  Ensaio 2  $= \frac{17500/\sqrt{3}}{446} = 22,65 \Omega$

$\chi_{sincrona \text{ saturada}}$  Ensaio 1  $= \frac{13000/\sqrt{3}}{392} = 19,15 \Omega$

$$X_{\text{síncrona saturada}} = \frac{13800 / \sqrt{3}}{446} = 17,86 \, \Omega$$

Ensaio 2

fazendo a média dos dois ensaios:

$$X_{\text{síncrona não saturada média}} = 22,665 \, \Omega = 1,12 \, \text{p.u.}$$

$$X_{\text{síncrona saturada média}} = 18,508 \, \Omega = 0,91 \, \text{p.u.}$$



## Sétima Questão:

$$a) S = 3 \text{ V} \cdot I_A \rightarrow I_A = \frac{S}{3 \text{ V}} = \frac{1200 \text{ K}}{3 \times 2300} \rightarrow I_{A_{\text{fase}}} = 173,91 \text{ A}$$

$$I_{A_{\text{linha}}} = \sqrt{3} \cdot 173,91 \rightarrow I_{A_{\text{linha}}} = 301,22 \text{ A}$$

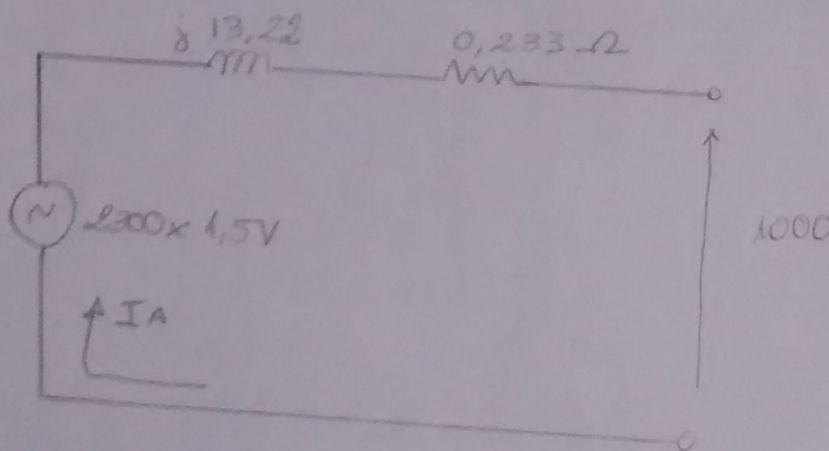
$$R_{CA} = R \cdot 1,4 = 0,167 \times 1,4$$

$$R = \frac{2 \cdot 0,25}{3} = 0,167$$

$$R_{CA} = 0,233 \, \Omega$$

$$b) \frac{E_A}{I_A} = \sqrt{R_{CA}^2 + X_S^2} \rightarrow X_S = \sqrt{\frac{E_A^2}{I_A^2} - R_{CA}^2}$$

$$X_S = \sqrt{\frac{2300^2}{173,91^2} - 0,233^2} \rightarrow X_S = 13,22 \, \Omega$$

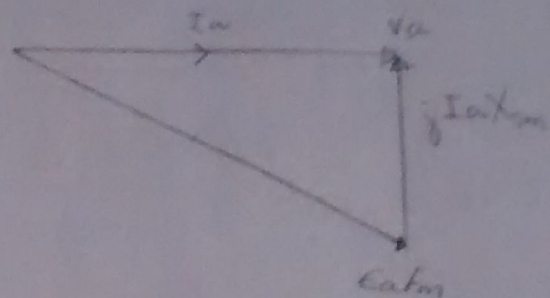
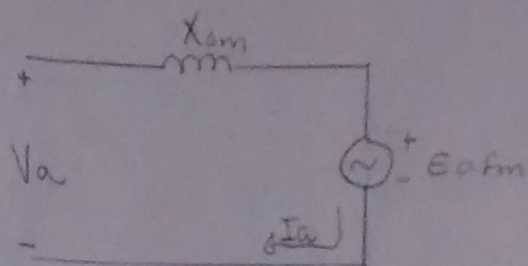


$$I_A = \frac{2300 \times 1,5 - 1000}{\sqrt{13,22^2 + 0,233^2}} \rightarrow I_A = 185,29$$

$$V_{RCA} = I_A \cdot R_{CA} = 185,29 \times 0,233 \rightarrow V_{RCA} = 43,17 \text{ V}$$

$$V_{X_S} = I_A \cdot jX_S = 185,29 \times j13,22 \rightarrow V_{X_S} = 2449,62 \angle 90^\circ \text{ V}$$

## Oitava Questão:



Onde  $E_{afm}$  é a tensão gerada do motor e  $X_{sm}$  é a sua reatância síncrona. A partir das especificações nominais do motor, desprezando as perdas, temos:

$$P_{\text{parente nominal}} = 2000 \cdot 0,746 = 1492 \text{ VA, trifásico}$$

$$P_{\text{parente nominal}} = 497 \text{ KVA/fase}$$

$$V_{\text{nominal}} = \frac{2300}{\sqrt{3}} = 1328 \text{ V, de fase}$$

$$I_{\text{nominal}} = \frac{497000}{1328} = 374 \text{ A/fase } \gamma$$

Do diagrama fasorial a plena carga, temos:

$$E_{afm} = \sqrt{V_a^2 + (I_a X_{sm})^2} = 1515 \text{ V}$$

Quando a fonte de potência é um barramento infinito e a excitação de campo é constante,  $V_a$  e  $E_{afm}$  são constantes. Então:

$$P_{\text{máx}} = \frac{V_a \cdot E_{afm}}{X_{sm}} = \frac{1328 \cdot 1515}{1,95} = 1032 \text{ KW/fase}$$

$$P_{\text{máx } 3\phi} = 3096 \text{ Kw}$$



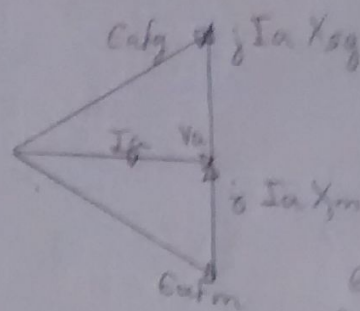
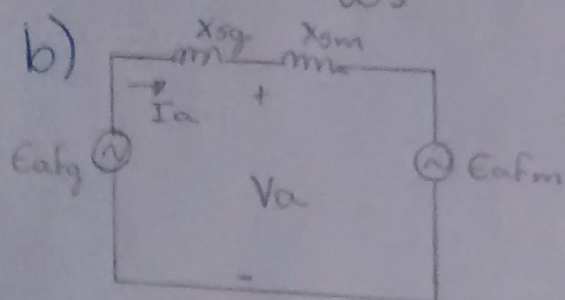
Em p.u. temos:

$$P_{\max} = \frac{3096}{1492} = 2,07 \text{ p.u.}$$

Com 30 polos a 60 Hz, a velocidade angular  $\omega_s$  crona pode ser encontrada a partir de:

$$\omega_s = \left( \frac{2}{\text{polos}} \right) \omega_c = \frac{2}{30} \cdot 2\pi \cdot 60 = 8\pi \text{ rad/s} \quad \text{logo,}$$

$$T_{\max} = \frac{P_{\max}}{\omega_s} = 123,2 \text{ kNm}$$



$E_{afg}$  : tensão gerada  
 $X_{sg}$  : reatância síncrona gerador  
 $E_{afm} = 1515 \text{ V/fase}$

Como antes  $V_a = 1330 \text{ V/fase}$  à plena carga e  $E_{afm} = 1515 \text{ V/fase}$

Do diagrama fasorial:

$$E_{afm} = \sqrt{V_a^2 + (I_a X_{sg})^2} = 1657 \text{ V}$$

Como as excitações de campo e as velocidades são constantes,  $E_{afm}$  e  $E_{afg}$  são constantes.

$$P_{\max} = \frac{1657 \cdot 1515}{4,6} = 546 \text{ kW/fase}$$

$$P_{\max, 3\phi} = 1638 \text{ kW}$$

- P.U.:

$$P_{\max} = \frac{1638}{1492} = 1,10 \text{ p.u.}$$

$$T_{\max} = \frac{1635 \cdot 10^3}{8\pi} = 65,2 \text{ N.m}$$