

## Aula Nro: 11

### I) Especificações Nominais de Gerador Síncrono

O propósito das especificações nominais é o de proteger o gerador de danos, devido ao uso impróprio da máquina. Estas especificações estão nos dados de placa e são: tensão, frequência, velocidade, potência aparente (kVA), fator de potência, corrente de campo, fator de serviço.

#### a) Tensão, velocidade e frequência nominal

A frequência nominal do gerador depende do sistema (rede) onde vai ser ligado. Exemplo no Brasil 60Hz, no Paraguay 50Hz, etc. Uma vez conhecida a frequência, haverá apenas uma velocidade de rotação possível para um dado número de pólos. A relação entre frequência e velocidade é dado pela equação:

$$f_e = \frac{n_m \cdot p}{120}$$

Sendo

$p$  : nro de pólos.

$f_e$ : frequência das tensões e correntes na saída do gerador (frequência da rede)

$n_m$  : velocidade de eixo do gerador em RPM.

A tensão gerada projetada vem dada por:

$$E_A = K \phi \omega \quad \left\{ \begin{array}{l} K \rightarrow \text{constante (varia com número de espiras)} \\ \Phi \rightarrow \text{varia com } I_f \\ \omega \rightarrow \text{(velocidade do gerador em rad/seg) constante} \end{array} \right.$$

- (i) É possível operar o gerador a tensão diferente do que foi projetado? Por exemplo uma tensão superior?

Resp: Não. Observando a equação de tensão gerada (tensão terminal em vazio), quanto maior tensão gerada implica em maior fluxo que **não pode aumentar indefinidamente** porque há uma corrente de campo máxima (senão a máquina satura). Além disso, quanto maior a tensão, mais se aproxima da tensão de ruptura de isolamento do enrolamento.

- (ii) Pode-se operar um gerador de 60Hz em 50Hz?

Resposta: Sim, desde que certas condições sejam satisfeitas.

O importante é que o fluxo máximo não deve aumentar (deve ser mantido constante).

Considere

$E_{A1}$ , tensão gerada a frequência  $f_1=60\text{Hz}$ ;

$E_{A2}$ , tensão gerada a frequência  $f_2=50\text{Hz}$

$$E_{A1} = K \phi \omega_1 \quad \left\{ \begin{array}{l} \frac{E_{A1}}{E_{A2}} = \frac{f_1}{f_2} \end{array} \right.$$

$$E_{A2} = K \phi \omega_2$$

Como o fluxo deve ser mantido constante, ficará:

$$E_{A2} = E_{A1} \frac{f_2}{f_1}$$

Então, pode operar sim com  $f_2 = 50\text{Hz}$ , porém a tensão gerada  $E_{A2}$  (ou tensão terminal do gerador), deve diminuir proporcional a diminuição da frequência  $E_{A2} = E_{A1}(50/60)$  a fim de manter o fluxo constante.

Como regra a relação  $E/f = \text{constante}$ .

Além disso, deve tomar atenção em relação à potência nominal (S) do gerador ao fazer esta diminuição de tensão.

Sabe-se que a potência trifásica é:

$$S = 3V_{\phi}I_A$$

Diminuindo a Tensão Terminal,  $V_{\phi}$ , a fim de manter a corrente de armadura nominal, a potência aparente deve diminuir na mesma proporção. Ou seja

$$S_2 = S_1(f_2/f_1)$$

Sendo

$S_1$ , potência aparente trifásica na frequência  $f_1$

$S_2$ , potência aparente trifásica na frequência  $f_2$

(iii) Pode-se operar um gerador de  $f_1 = 60\text{Hz}$  em  $f_2 = 50\text{Hz}$ ?

Resp: Seguindo o mesmo raciocínio do caso anterior, a resposta é sim. Neste caso a tensão terminal poderia ser igual à tensão original  $E_{A2} = E_{A1}$  porque não haverá saturação (ou inclusive a tensão poderia ser elevada até  $E_{A2} = E_{A1}(60/50)$ , caso a isolação da bitola o permita).

Em relação a potência nominal do gerador nesta situação tem-se:

$$S = 3V_{\phi}I_A$$

Caso se mantenha a tensão igual à tensão original, a corrente de armadura nominal será mantida o que permitirá que a potência nominal do gerador original não mude.

~~Entretanto, a fim que o fluxo máximo fique igual, a tensão teria que ser aumentada para  $E_{A2} = E_{A1}(60/50)$ . Neste caso deve-se verificar se as isolações dos enrolamentos suportam esta nova tensão máxima.~~

## **b) Potência aparente e fator de potência**

b.1) Torque mecânico: O eixo é suficientemente forte para lidar com potência superior a nominal.

b.2) Aquecimento dos enrolamentos

### **-Estator**

Corrente máxima na armadura:  $S_{nom} = \sqrt{3} \cdot V_L \cdot I_{Lmax}$  ( $I_A$ , depende da ligação Y ou  $\Delta$ )

O aquecimento é devido as perdas no cobre no estator:

$$P_{Pestator} = 3 I_A^2 \cdot R_A$$

Sendo

$P_{Pestator}$ : Potência de perdas do estator

**- Rotor**

É devido as perdas no cobre no circuito de campo

$$P_{Prototor} = I_F^2 \cdot R_F$$

Sendo

$P_{Prototor}$ : Potência de perdas do rotor

O efeito do aquecimento nos enrolamentos pode ser visualizado na figura:

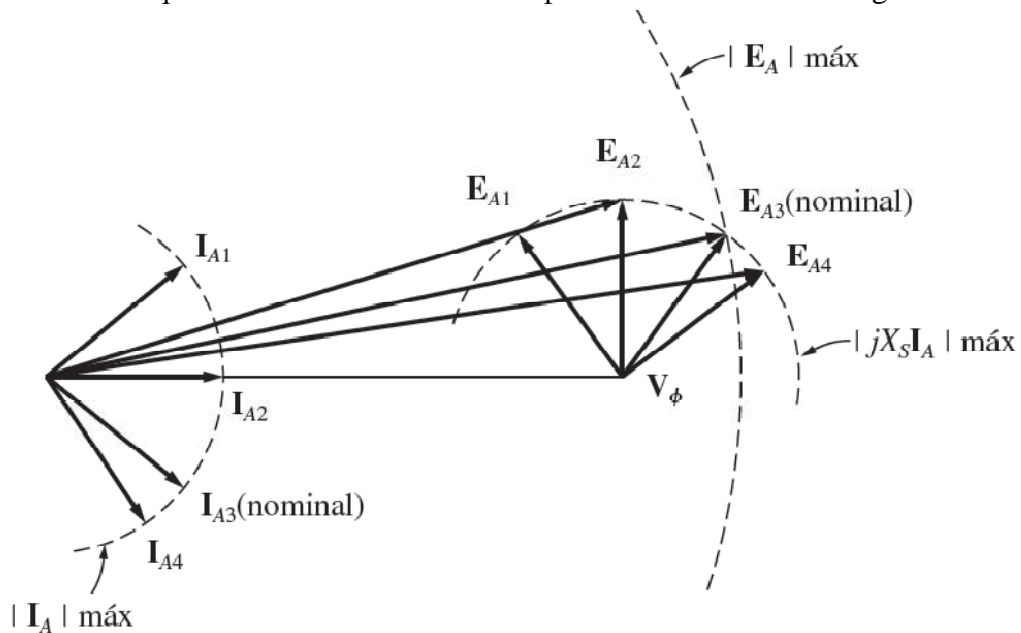


Figura: O limite de corrente de campo do rotor determina o fator de potência nominal

Observação:

Para  $I_{A3}$ , que corresponde a  $E_{A3}$ , tem-se o fator de potência nominal. Nesse caso, fatores de potência menores ou com maior atraso (mais indutivo) faz com que a máquina opere com corrente de campo maior a nominal e queime. Por exemplo, para ângulos de  $I_{A4}$ , a tensão  $E_{A4}$  excede o valor máximo ( $E_{A,max}$ ). Se o gerador for operado a corrente nominal e fator de potencia de  $I_{A4}$  o enrolamento de campo queimaria.

É possível operar o gerador a f.d.p. menores ( ou mais atrasado) que o nominal?

Resposta: Sim, desde que o módulo de  $I_A$  seja inferior ao nominal, ou seja,  $I_A < I_{Anom}$ . Nesse caso a potência aparente do gerador deverá ser menor ao valor nominal original.

c) Curva de capacidade do gerador síncrono

Os limites de aquecimento dos enrolamentos de rotor e estator podem ser expressos em forma gráfica pelo diagrama de capacidade

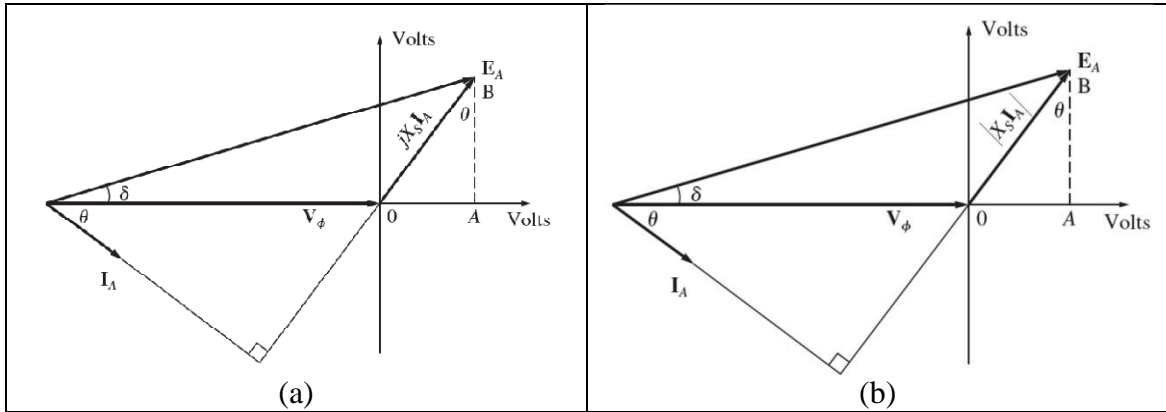


Fig 11.1: (a) Diagrama fasorial do gerador. (b) Diagrama fasorial considerando apenas módulo

As potências trifásicas nos terminais do gerador são:

$$P = 3 V_\phi \cdot I_A \cdot \cos \theta$$

$$Q = 3 V_\phi \cdot I_A \cdot \sen \theta$$

$$S = 3 V_\phi \cdot I_A$$

Multiplicando os lados do diagrama da figura 11.1(b) pelo fator  $3 V_\phi / X_S$ , tem-se:

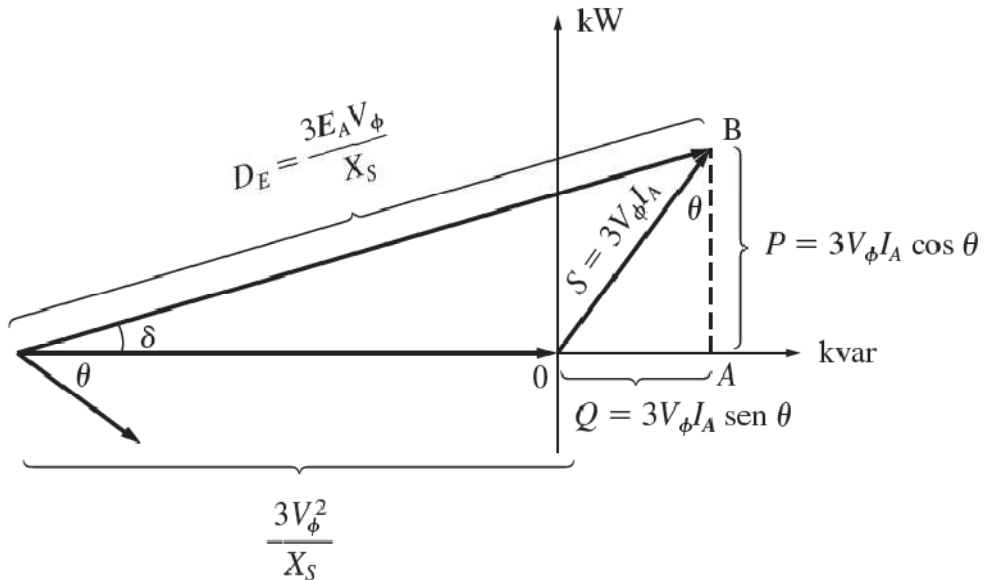


Fig 11.2: Diagrama fasorial após a multiplicação do fator  $3 V_\phi / X_S$

A partir do triângulo 0-A-B tem-se:

$$P = 3 V_\phi I_A \cos \theta = \frac{3 V_\phi}{X_S} (X_S I_A \cos \theta)$$

$$Q = 3 V_\phi I_A \sen \theta = \frac{3 V_\phi}{X_S} (X_S I_A \sen \theta)$$

Nos eixos da tensão, a origem do diagrama fasorial está em  $-V_\phi$  no eixo horizontal, de modo que a origem do diagrama de potência está em:

$$Q = \frac{3V_\phi}{X_S}(-V_\phi)$$

$$= -\frac{3V_\phi^2}{X_S}$$

A corrente de campo é proporcional ao fluxo da máquina e o fluxo da máquina proporcional a  $E_A$ . O comprimento correspondente a  $E_A$  no diagrama de potência é:

$$D_E = -\frac{3E_A V_\phi}{X_S}$$

A corrente de armadura  $I_A$  é proporcional a  $X_S I_A$ , e o comprimento a  $X_S I_A$  no diagrama de potência é  $3V_\phi I_A$ .

A curva final de capacidade do gerador síncrono está na figura 11.3, que é um gráfico P versus Q, com a potência ativa no eixo horizontal e a potência reativa no eixo vertical. Linhas de corrente de armadura constante,  $I_A$ , aparecem como linhas  $S=3V_\phi I_A$  constante, as quais são círculos concêntricos em torno da origem. Linhas de corrente de campo constante correspondem a linhas de  $E_A$ , são mostradas como círculos  $3E_A V_\phi / X_S$  concentrados no ponto  $Q=-3E_A(V_\phi)^2/X_S$ . Qualquer ponto de operação que estiver dentre desses círculos é um ponto de operação seguro. Uma curva de capacidade que reflete a potência máxima da máquina motriz está mostrada também na Figura 11.3.

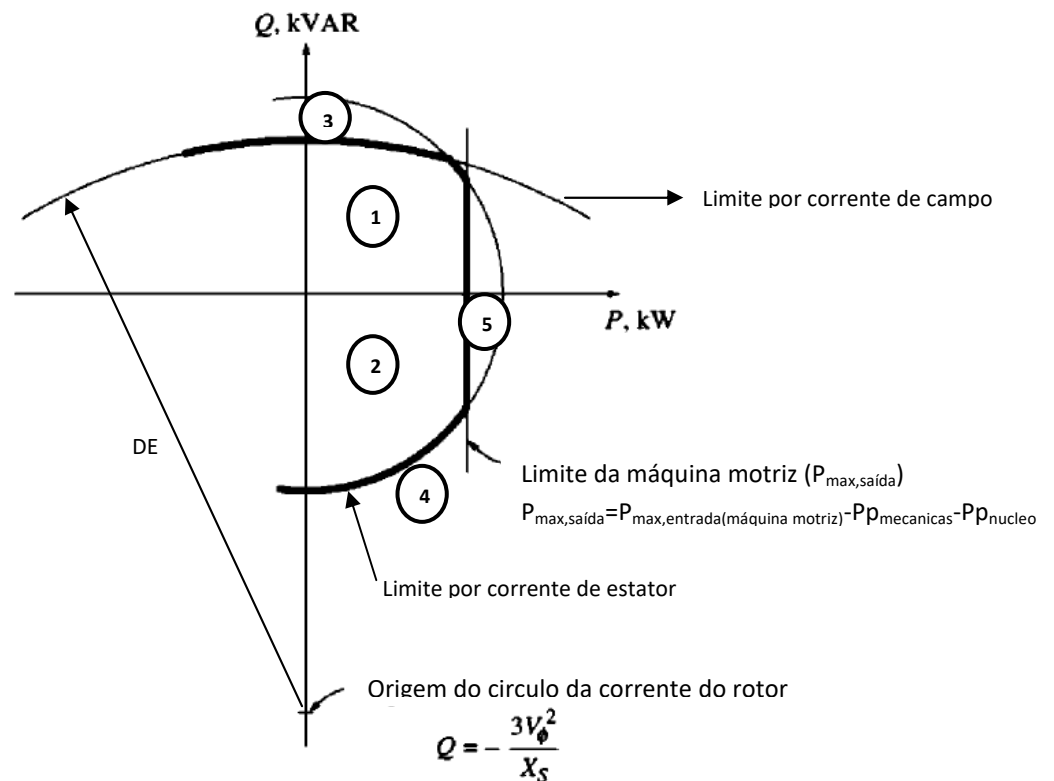


Figura 11.3: Curva de Capacidade da máquina síncrona

Sendo:

$P_{max,saída}$ : Potência máxima de saída do Gerador síncrono

$P_{\text{max,entrada(máquina motriz)}}$ : Potência máxima de entrada do Gerador Síncrono que é igual á potencia da máquina motriz

$P_{\text{mecânicas}}$  : Potência de perdas mecânicas da máquina síncrona

$P_{\text{núcleo}}$ : Potência de perdas do núcleo da máquina síncrona

Exemplo1: A partir da Figura 11.3, verifique se os pontos 1 à 5 são de operação segura. Por quê?

1 – OK

2 – OK

3 – Ultrapassa o limite de  $I_f$  que aqueceria o circuito de campo

4 – Ultrapassa o limite de  $I_A$  que aqueceria o circuito de armadura

5 – Ultrapassa o limite da máquina motriz (motor primo). Sobrecarrega a maquina motriz

#### **d) Operação para curtos intervalos de tempo e fator de serviço**

A máquina síncrona pode operar acima da corrente (potência) nominal?

Resposta: Sim, porém apenas em intervalos curtos de tempo, antes que haja sobreaquecimento do enrolamento de campo e armadura e a máquina queime.

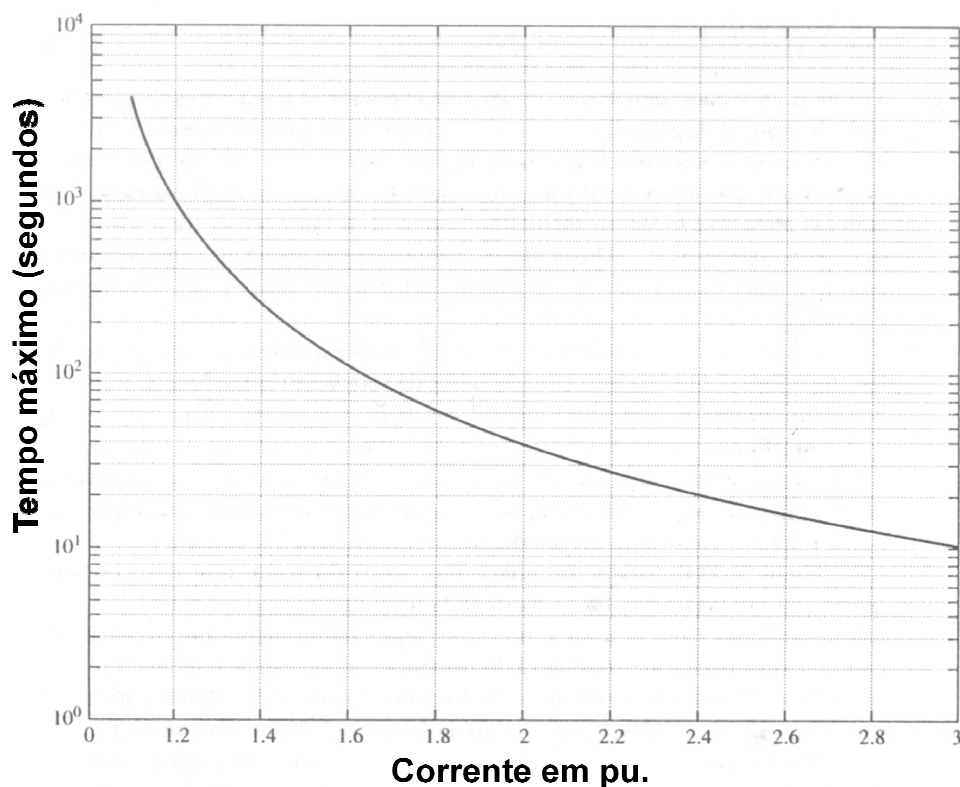


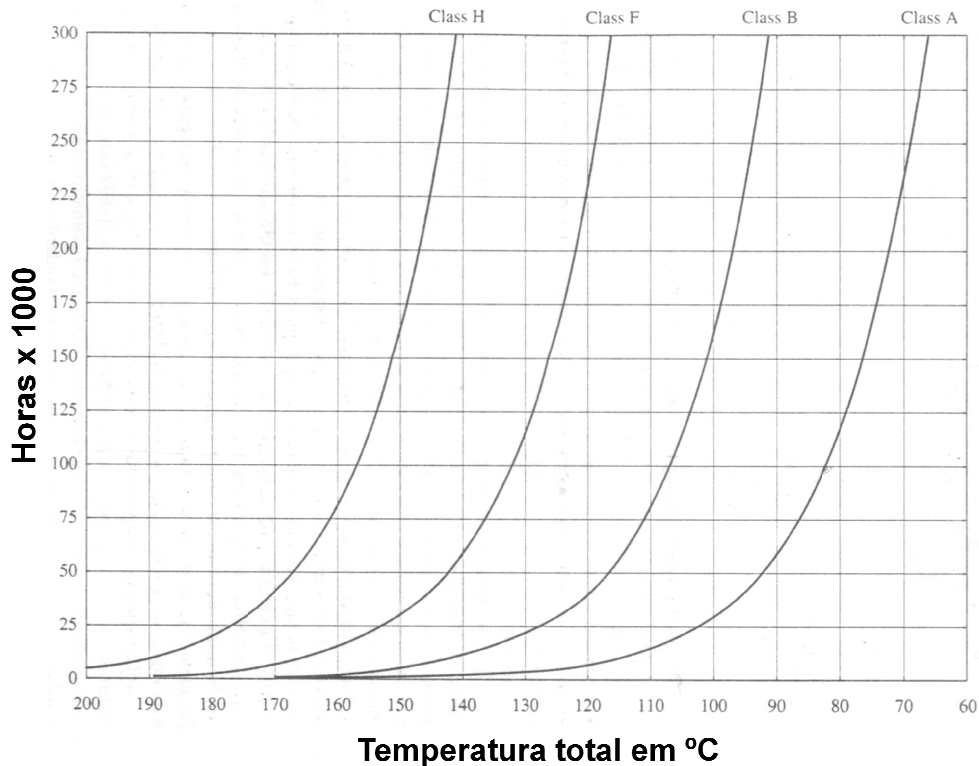
Fig 11.4: Curva de dano térmico para uma máquina síncrona, considerando que o enrolamento do estator já estão na sua temperatura nominal quando a sobrecarga é aplicada

Exemplo: Para as correntes de saída abaixo, determine o tempo máximo antes do enrolamento do estator sofrer dano usando a curva da figura 11.4

Múltiplos de In	Sobrecarga	Tempo(s)
1,2	20%	1000
2	100%	40
3	200%	10

Qual é influência do aumento da temperatura na vida útil da máquina?

A elevação da temperatura diminui o tempo vida da máquina. Esta diminuição depende da classe de isolamento.



**Fig11.5: Tempo de vida x Temperatura do enrolamento do estator para várias classes de isolamento**

Exemplo:

Classe F: em 110° → Operação sem interrupção (vide figura acima)

em 120° → 225000h

em 130° → 120000h

em 140° → 60000h

Para cada 10°C de aumento, redução de 50% da vida útil (aproximado).

As máquinas costumam apresentar o fator de serviço ( $f_s$ ) que é definido como a potência máxima (kVA) verdadeira e a potência especificada.

$$f_s = \frac{Pot_{maxima} \cdot verdadeira}{Pot. placa}$$

Por exemplo, se na placa estiver especificado que  $f_s=1,15$ ; implica que ele pode ser sobrecarregado em 15% sem dano no mesmo.