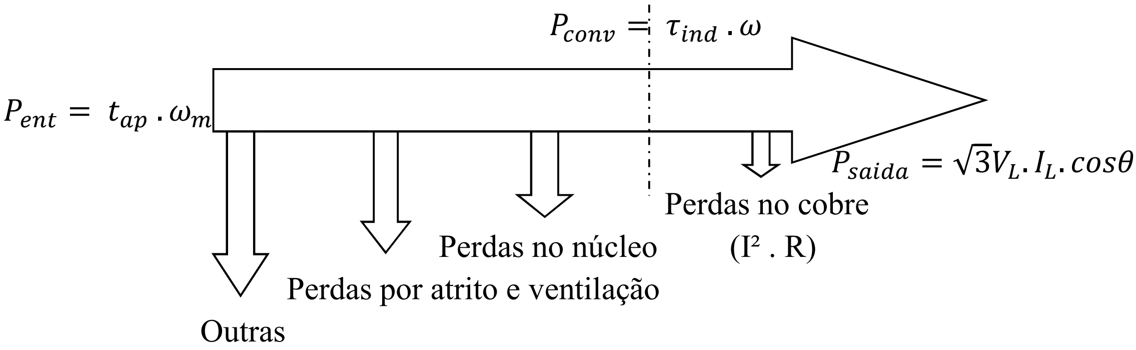
3.8) Potencia e torque em um gerador síncrono



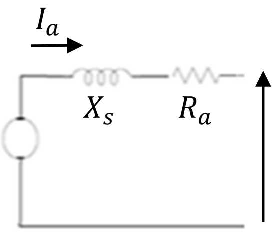
P_{ent} = potencia de entrada
P_{sai} = potencia de saída
t_{ap} = torque aplicado

$\eta = \frac{P_{saida}}{P_{ent}} . 100$

P_{conv} = potencia convertida
τ_{ind} = torque induzido

Observação: Considerarando que Xs >> Rs, então, Pconv ≈ Psaída

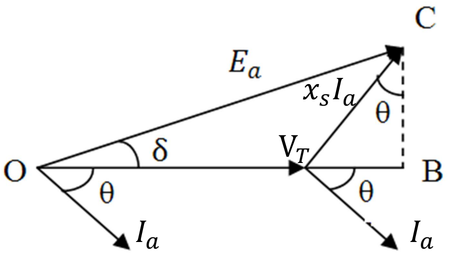
Circuito equivalente monofásico



$V_T = V_{1\phi}$ (tensão monofásica)

Xs >> Ra   Ra≈0

Considerando f.d.p. indutivo



Segmento C-B

$E_a \, sen \, \delta = I_a \, X_S \cos\theta \, . \frac{1}{X_S}$

$\frac{E_a}{X_S} \, sen \, \delta = I_a . \cos\theta$

$\frac{E_a . V_T}{X_S} \, sen \, \delta \quad = \quad V_T . \, I_a . \cos\theta = P_{1\phi}$ (potência monofásica nos terminais)

$(P_{conv1\phi}) \quad = \quad (\quad P_{1\phi} \quad)$

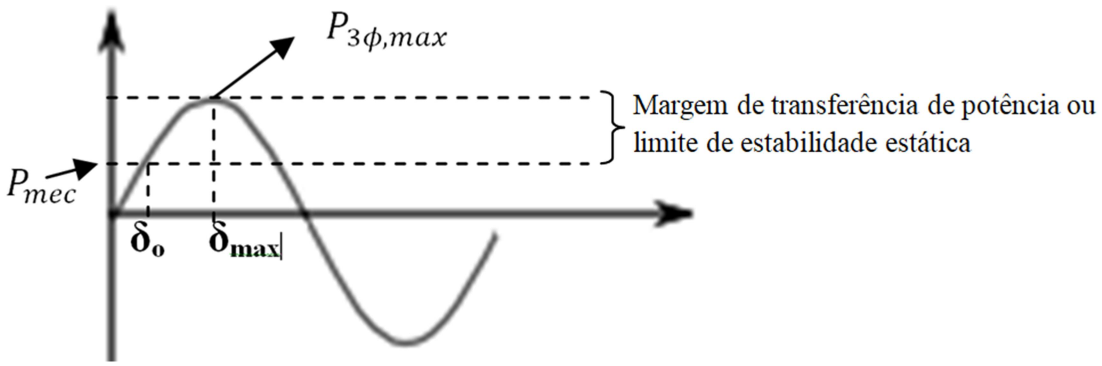
$P_{1\phi} = \frac{E_a . V_T}{X_S} \, sen \, \delta \qquad P_{3\phi} = \frac{3 . E_a . V_T}{X_S} \, sen \, \delta$ (potência trifásica nos terminais)

Para δ pequeno → menos potencia

Para δ grande → mais potencia
δ → ângulo de potencia

$\tau_{ind} = \frac{P_{conv}}{\omega}$ $\tau_{ind,1\phi} = \frac{E_a \, . \, V_T}{X_S \, . \omega_S} \, . \text{sen } \delta$
δ → ângulo de torque

$\tau_{ind,3\phi} = 3 \; \tau_{ind,1\phi}$

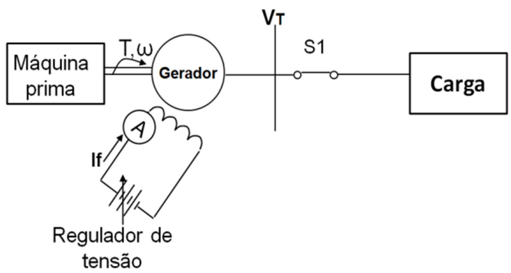


$\boldsymbol{\delta_o}$: Ângulo de potência no ponto de operação ($P_{mec} = P_{3\phi}$)
$\boldsymbol{\delta_{max}}$: Ângulo máximo

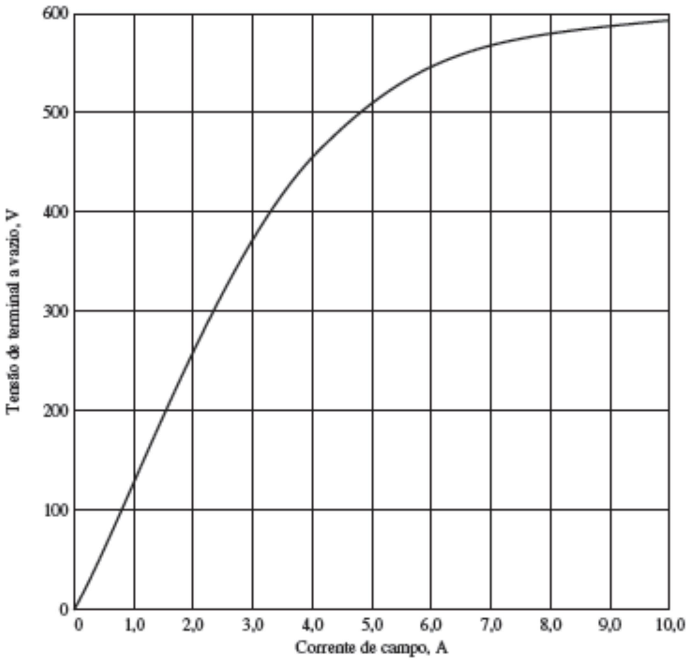
Margem de Potência = $P_{3\phi,max}$- $P_{3\phi}$
Margem de ângulo = $\boldsymbol{\delta_{max}}$ **-** $\boldsymbol{\delta_o}$
Observação: δ_{max} = 90° para geradores síncronos de pólos lisos. Para geradores síncronos de pólos salientes é um pouco menor.

3.9 GERADOR OPERANDO ISOLADO

Quando o gerador opera com uma carga isoladamente, a tensão terminal variará dependendo da carga. Estes exemplos serão visualizados nos seguintes exemplos:



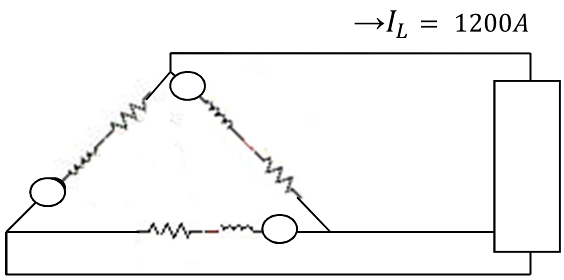
Exemplo 1) Um gerador síncrono, 480V, 60Hz, ligação Δ, 4 pólos, possui uma curva de saturação. Este gerador possui uma reatância síncrona de 0,1Ω e $R_a = 0{,}015\,\Omega$. A máquina tem uma curva de saturação em vazio como mostra a figura abaixo.



Em plena carga a máquina fornece 1200A e f.d.p. = ↓0,8.

a) Qual a velocidade de rotação do gerador em rpm?
b) Qual deve ser a corrente de campo do gerador para obter 480V nos terminais em vazio?
c) Se o gerador é ligado a uma carga de 1200A e f.d.p. = ↓0,8. Qual será a corrente de campo necessária para manter a tensão terminal em 480V.
d) Quanta potência o gerador está fornecendo agora? Quanta potência é fornecida ao gerador pela máquina motriz (máquina prima). Qual é a eficiência dessa máquina? Qual é o torque induzido?
e) Se a carga do gerador for retirada de forma repentina, qual será a tensão terminal?
f) Refaça o item c considerando carga de 1200A e f.d.p. = ↑0,8.
g) Refaça o item anterior considerando carga de 1200A e f.d.p. = 1

Solução:



a) ns = $\frac{120.f}{p} = \frac{120.60}{4} = 1800\ rpm$

b) Pela curva de saturação, para $E_A = 480\ V$, $I_L = 4{,}5\ A$

c) $I_A = \frac{I_L}{\sqrt{3}} = \frac{1200}{\sqrt{3}} = 692{,}82A$

$\cos\varphi = 0{,}8$ φ=$\theta_V - \theta_I$ $\theta_I = \theta_V - \varphi$ $\theta_V = 0° - cos0{,}8$

$I_A = 692{,}82\ \underline{|-\cos 0{,}8}$

$I_A = 692{,}82\ \underline{|-36{,}87°}$

$E_{Alinha} = V_T + I_A.Z_S = 480\ \underline{|0°} + 692{,}82\ \underline{|-36{,}87°}.(0{,}015 + j0{,}1)$

$E_A = 532{,}16\ \underline{|5{,}36°}$

Pela curva de saturação, para $E_A = 532{,}16\ V$, $I_L = 5{,}7\ A$

d) $P_{saida} = \sqrt{3}\ V_L.I_L.cos\theta = \sqrt{3}.480.1200.0{,}8 = 798{,}129\ kW$

$P_{CU} = 692^2.0{,}015.3 = 21{,}6\ kW$

d.1) $P_{entrada} = P_{saida} + P_{CU} + P_{NU} + P_{A/V}$

$P_{entrada} = 798{,}129 + 21{,}6 + 30 + 40 = 889{,}729\ kW$

Eficiencia: η = Psaída/Pentradax100 = 89,75%

d.2) $P_{convertida} = P_{saida} + P_{CU} = 798{,}129 + 21{,}6 = 819{,}729\ kW$

a) $\tau_{ind} = \frac{P_{conv}}{\omega} = \frac{819{,}729}{\frac{120.60}{4}.\frac{2\Pi}{60}} = \frac{819{,}729}{188{,}49} = 4{,}349\ kN.m$

e) Se a carga for retirada em forma repentina, a tensão terminal será igual a tensão interna. $V_T = E_A = 532$ [V]

f) f.d.p. = ↑0,8 ; $I_A = 692{,}82\ \underline{|36{,}87°}$

$E_A = V_T + I_A.Z_S = 480\ \underline{|0°} + 692{,}82\ \underline{|36{,}87°}.(0{,}015 + j0{,}1)$

$E_A = 450{,}979\ \underline{|7{,}858°}$

Pela curva de saturação, para $E_A = 451\ V$, $I_f = 4\ A$

g) $I_A = 692{,}82\ \underline{|0°}$

$E_A = V_T + I_A.Z_S = 480\ \underline{|0°} + 692{,}82\ \underline{|0°}.(0{,}015 + j0{,}1)$

$E_A = 495{,}26\ \underline{|8{,}04°}$

Pela curva de saturação, para $E_A = 495\ V$, $I_f = 4{,}7\ A$

Exemplo 2) Um gerador de 480V, 50Hz, ligado em Y, 6 pólos, possui uma reatância síncrona de 1 Ω. Sua corrente de armadura a plena carga é de 60A, com f.d.p.=0,8↓.

O gerador possui perdas por atrito e ventilação de 1,5 kW, as perdas no núcleo são de 1KW a 50Hz a plena carga. Considerando que a resistência de armadura é pequena, despreze as perdas por efeito joule.

A corrente de campo é ajustada tal que a tensão terminal, V_T, seja de 480V sem carga.

a) Qual é a velocidade de rotação?

b) Qual é a tensão terminal deste gerador quando uma carga é ligada a ele, com as seguintes características:

b.1) Corrente de carga igual a corrente nominal, f.d.p.=0,8↓

b.2) Corrente de carga igual a corrente nominal, f.d.p.=1

b.3) Corrente de carga igual a corrente nominal, f.d.p.=0,8↑

c) Qual a eficiência do gerador quando opera a corrente nominal e f.d.p.=0,8↓?

d) Qual o torque aplicado pelo motor primo a plena carga? Qual o torque induzido?

e) Qual é a regulação de tensão para os casos do item b?

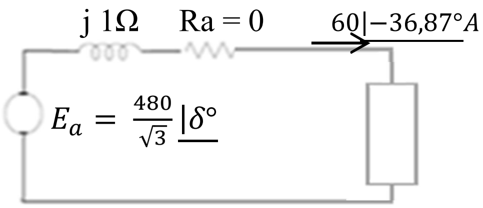
f) Suponha que a carga é de 1200A. Qual é o fator de potencia da carga a fim que a regulação seja zero.

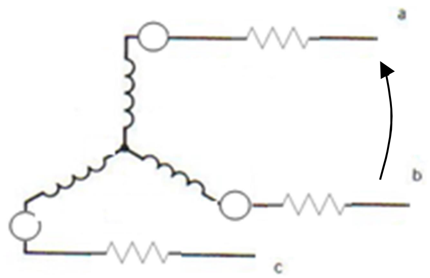
Solução:

a) $n_m = \frac{120}{p} = \frac{120\,.50}{6} = 1000\ rpm$

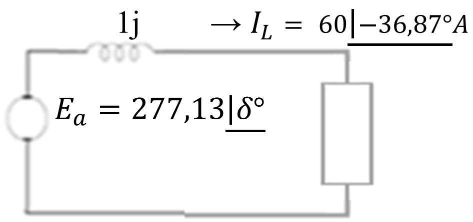
$$\omega_m = 100\,.\frac{2\,\Pi}{60} = 106{,}66\ rad/s$$

b)





$$E_a = \frac{480}{\sqrt{3}} = 277{,}13\angle{\delta°}$$



$$E_A = V_T + I_L\,.jxs$$

$$277{,}13\angle{\delta°} = V_T\angle{0°} + 60\angle{-36{,}87°}\,.1j$$

$$277{,}13\angle{\delta°} = V_T\angle{0°} + 60\angle{53{,}13°}$$

$$277{,}13\angle{\delta°} = [V_T + 60\cos 53{,}13°] + j60\ sen\ 53{,}13°$$

$$(277{,}13\angle{\delta°})^2 = \underbrace{[V_T + 36]}^2 + j48^2 \qquad 277{,}13^2 = a^2 + 48^2$$

$$\underbrace{277{,}13^2 - 48^2}_{A} = 36^2 + 72V_T + V_T^2$$
$$73201 = 72V_T + V_T^2$$
$$72V_T + V_T^2 - 73201 = 0$$

a = 272,94
V_T = a - 36
V_T = 236,94 V

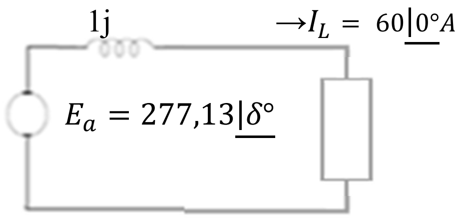
$$277{,}13\angle\delta° = 272{,}94 + j48$$

$$\delta = \tan^{-1}\frac{48}{272{,}94} = 9{,}974°$$

$$V_{TLinha} = \sqrt{3}\,V_T = \sqrt{3}\,.236{,}94 = 410{,}4\ V$$

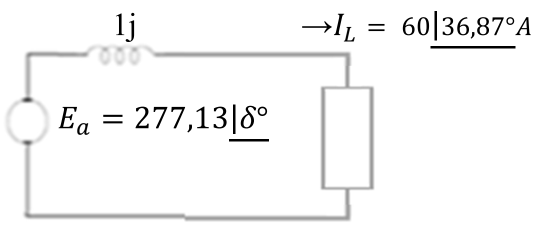
Após conectar uma carga indutiva a tensão terminal tende a diminuir.

b.2) f.d.p. = 1



$$E_A = V_T + I_L\,.jxs$$
$$277{,}13\angle\delta° = V_T\angle 0° + 60\angle 0°\,.1j$$
$$277{,}13\angle\delta° = V_T\angle 0° + 60\angle 90°$$
$$277{,}13\angle\delta° = V_T + 60\cos 90 + j60\ sen\ 90$$
$$277{,}13^{\ 2} = V_T^2 + 60^2$$
$$V_T = \sqrt{277{,}13^2 - 60^2} = 270{,}56\ V$$
$$V_{TLinh} = \sqrt{3}\,.270{,}56 = 468{,}6V$$

b.3) f.d.p. = 0,8↑ → capacitivo



$$E_A = V_T + I_L\,.jxs$$
$$277{,}13\angle\delta° = V_T\angle 0° + 60\angle 36{,}87°\,.1j$$
$$277{,}13\angle\delta° = V_T\angle 0° + 60\angle 126{,}87°$$
$$\underbrace{277{,}13\angle\delta°}_{A} = \underbrace{V_T + 60\cos 126{,}87}_{a} + \underbrace{j60\ sen\ 126{,}87}_{b}$$

$$A^2 = a^2 + b^2$$

$$\begin{cases} V_T = 308{,}94\ V \\ \delta = 9{,}974° \\ V_{TLinha} = \sqrt{3}\,.\,308{,}94 = 535{,}1\ V \end{cases}$$

c) $P_{saida} = \sqrt{3}\, V_L . I_L . cos\theta = \sqrt{3}\, .410{,}4\, .60\, .0{,}8 = 34{,}12\ kW$

$P_{ent} = P_{saida} + P_{NU} + P_{CU} + P_{A/V} = 34{,}12 + 1 + 1{,}5 = 36{,}62$ kW

$$\eta = \frac{P_{saida}}{P_{ent}} . 100 = 93{,}2\%$$

d) $\tau_{ind} = \frac{P_{saida}}{\omega} = \frac{34120}{1000\, .\frac{2\pi}{60}} = 325{,}82\ N.m$

e) $RV = \frac{E_a - V_T}{V_T}\, .100$

e.1) $RV = \frac{480 - 410{,}4}{410{,}4}\, .100 = 16{,}96\%$

e.2) $RV = \frac{480 - 468{,}52}{468{,}52}\, .100 = 2{,}45\%$

e.3) $RV = \frac{480 - 5\quad ,1}{535{,}1}\, .100 = -10{,}29\%$

f) Solução.

Para que a regulação seja zero, implica que $|E_a| = |V_T|$

Considere que a corrente tem uma defasagem com ângulo θ (desconhecida) em relação à tensão de armadura e faça como no item b. Aplique um método numérico iterativo e determina-se θ.

A resposta deve dar θ = 6.2°(positivo), portanto fdp =0,9941 capacitivo.