

3) MÁQUINAS SÍNCRONAS

3.1) Características da Máquina Síncronas

$$\omega_s = \frac{\omega_e}{p/2} \quad \omega_s = \text{Velocidade síncrona mecânica em RPM (do eixo)}$$

$$\omega_e = 2 \cdot \pi \cdot f \quad \omega_e = \text{freqüência angular da rede (rad/s)}$$

$$n_s = \frac{120 \cdot f}{p} \quad p = \text{número de pólos}$$

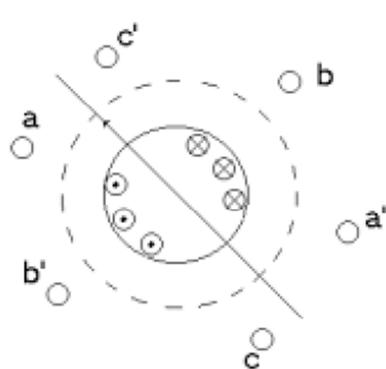
$n_s = \text{velocidade mecânica em RPM}$
 $f = \text{freqüência da rede (Brasil 60Hz).}$

Exemplo: Itaipu

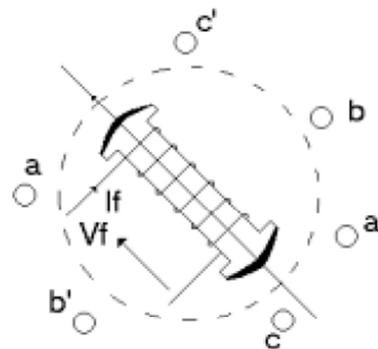
| | |
|---|---|
| 10 unidades 50 Hz 18 kV p = 66 | 10 unidades 60 Hz 18kV p = 78 |
| $n_s = \frac{120 \cdot 50}{66} = 90,91 \text{ rpm}$ | $n_s = \frac{120 \cdot 60}{78} = 92,31 \text{ rpm}$ |
| $\omega_s = \frac{2 \cdot \pi \cdot f}{p/2} = \frac{2 \cdot \pi \cdot 50}{66/2} = 9,52 \frac{\text{rad}}{\text{s}}$ | $\omega_s = \frac{2 \cdot \pi \cdot f}{p/2} = \frac{2 \cdot \pi \cdot 60}{78/2} = 9,66 \frac{\text{rad}}{\text{s}}$ |

Partes { Estator (fixa) = Armadura (Potencia)
 Rotor (móvel) = Enrolamento de campo

Tipos { Rotor liso (turbogeradores)
 alta velocidade
 Rotor de pólos salientes (hidrogeradores)
 baixa velocidade



(a) Rotor liso



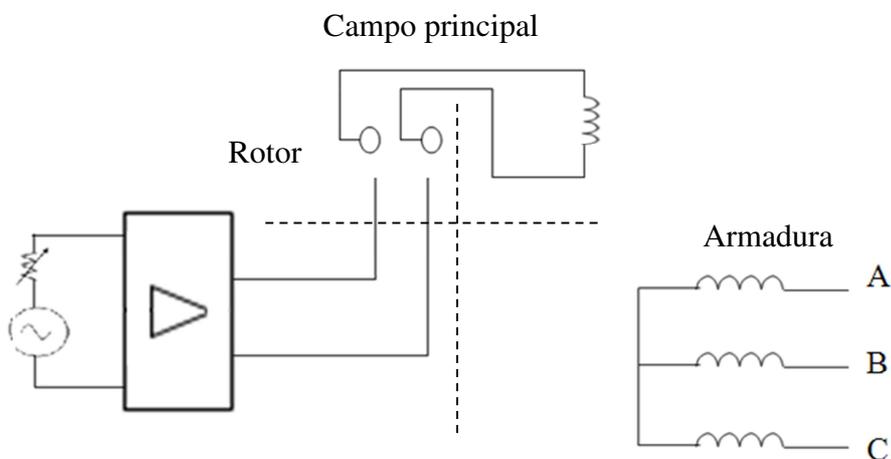
(b) Rotor saliente

3.2) Circuito de Campo da Máquina Síncrona

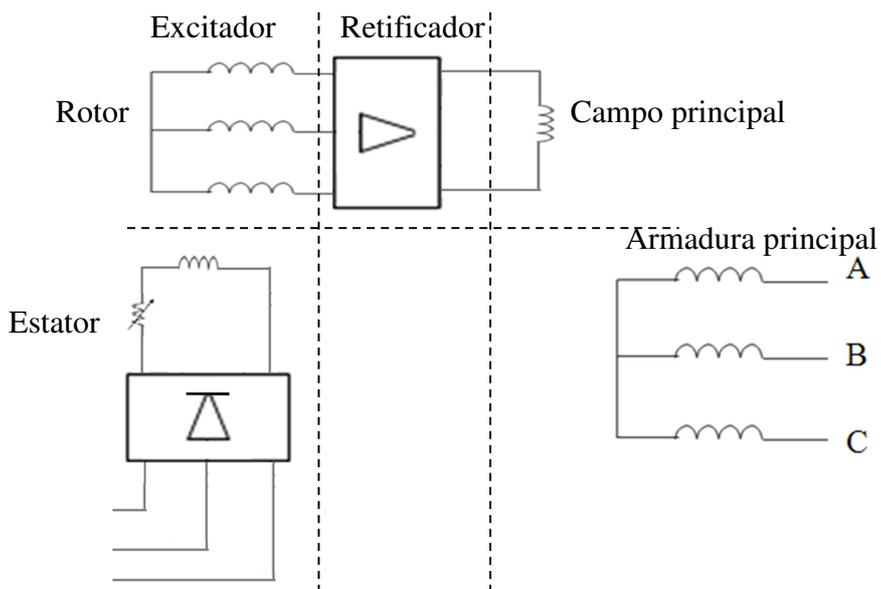
- a) Alimentação externa (anéis deslizantes e carvões)
- b) Alimentação de uma fonte própria (sem anéis deslizantes)

| Com anéis deslizantes | Sem anéis |
|--|--------------------------|
| Custo baixo | Custo elevado |
| Manutenção elevada | Manutenção baixa |
| Perda de potencia devido a queda de tensão nos carvões | Sem quedas de tensão |
| Máquinas de pequeno porte | Máquinas de grande porte |

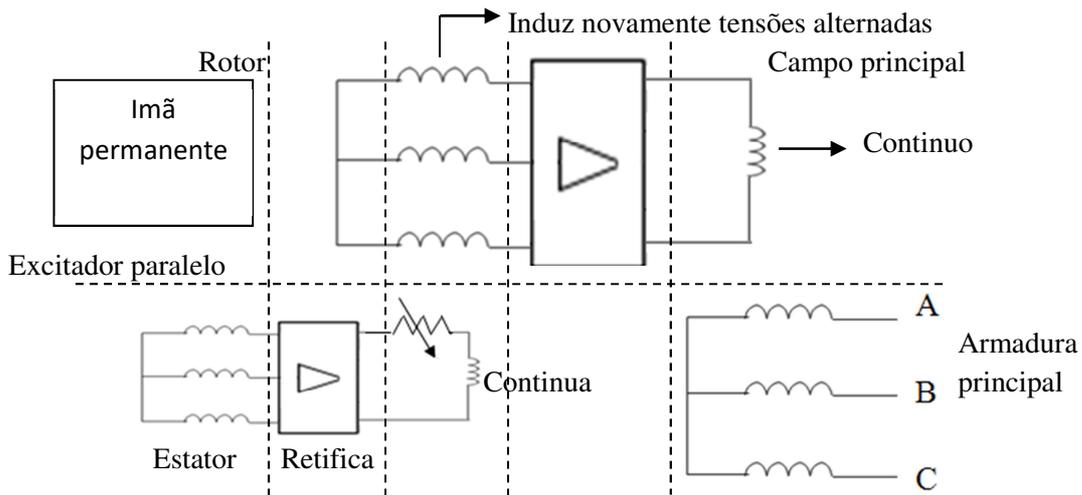
Tipo I – Com alimentação externa e anéis deslizantes



Tipo II – Com alimentação externa e sem anéis deslizantes



Tipo III – Com alimentação externa, com imã permanente e sem anéis deslizantes



Nas equações a seguir ao invés de colocar ω_e será usado apenas ω para simplificar.

3.3) Princípio de funcionamento da máquina síncrona como gerador

$$e = e_M \cdot \cos(\omega t - \alpha)$$

Se utilizar referência girante localizada no rotor

As tensões induzidas por fase ficarão

$$e_{ind aa'} = N_c \cdot \phi \cdot \omega \cdot \cos \omega t \text{ ou}$$

$e_{ind aa'} = N_c \cdot \phi \cdot \omega \cdot \text{sen } \omega t$ (usando uma função seno como referência)

$$e_{ind bb'} = N_c \cdot \phi \cdot \omega \cdot \text{sen}(\omega t - 120^\circ)$$

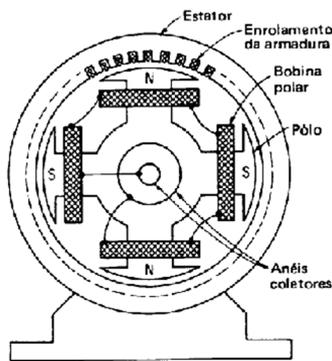
$$e_{ind cc'} = N_c \cdot \phi \cdot \omega \cdot \text{sen}(\omega t + 120^\circ)$$

$$E_{max} = N_c \cdot \phi \cdot \omega \quad \omega = 2 \cdot \pi \cdot f$$

$$E_{ARMS} = \frac{E_{max}}{\sqrt{2}} = \frac{N_c \cdot \phi \cdot \omega}{\sqrt{2}} = \frac{N_c \cdot \phi \cdot 2 \cdot \pi \cdot f}{\sqrt{2}}$$

$$E_{ARMS} = N_c \cdot \phi \cdot \sqrt{2} \cdot \pi \cdot f$$

$$E_{ARMS} \cong 4,44 N_c \cdot \phi \cdot f$$



Exemplo: Para um gerador de 2 pólos a densidade de fluxo do rotor pico é 0,2T e a velocidade de rotação do eixo é 3600 rpm. O diâmetro da máquina é 0,5m e o comprimento da espira é 0,3m e há 15 espiras por enrolamento. A máquina está ligada em Y. Determine:

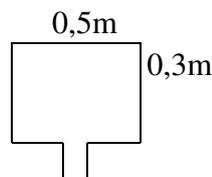
- Tensão por fase do gerador, em função do tempo
- Tensão E_{ARMS} por fase
- Tensão E_{ARMS} de linha

$$N_c = 15$$

$$B = 0,2 \text{ T}$$

$$\omega = 3600 \text{ rpm} = 377 \text{ rad/s}$$

$$\phi = B \cdot A = 0,2 \cdot (0,5 \cdot 0,3) = 0,03 \text{ Wb}$$



$$\begin{aligned}
 \text{a) } e_{ind\ aar} &= 15 \cdot 0,03 \cdot 377 \cdot \text{sen } \omega t = 169,65 \cdot \text{sen } \omega t \\
 e_{ind\ bbr} &= 15 \cdot 0,03 \cdot 377 \cdot \text{sen}(\omega t - 120^\circ) = 169,65 \cdot \text{sen}(\omega t - 120^\circ) \\
 e_{ind\ ccr} &= 15 \cdot 0,03 \cdot 377 \cdot \text{sen}(\omega t + 120^\circ) = 169,65 \cdot \text{sen}(\omega t + 120^\circ)
 \end{aligned}$$

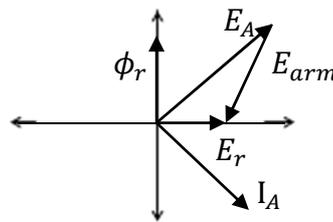
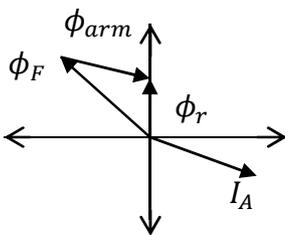
$$\text{b) } E_{ARMS} = \frac{169,65}{\sqrt{2}} = 119,96 \text{ V}$$

$$\text{c) } V_{LRMS} = \sqrt{3} \cdot E_{ARMS} = 119,96 \cdot \sqrt{3} = 207,77 \text{ V}$$

3.4) Circuito Equivalente em regime permanente

Ao fluir correntes 3 ϕ no estator é produzido um fluxo na armadura (reação de armadura) que distorce o fluxo principal (ϕ_F) do circuito de campo. O fluxo de reação de armadura é estacionário em relação ao fluxo principal, portanto pode-se somá-los para encontrar a resultante.

Para a fase a-a' tem-se:



ϕ_F = fluxo devido ao circuito de campo (principal)

ϕ_{arm} = fluxo devido à reação de armadura

$\phi_r = \phi$ resultante

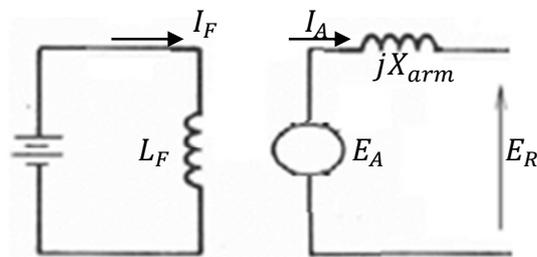
$$\vec{\phi}_r = \vec{\phi}_F + \vec{\phi}_{arm}$$

$$\vec{E}_R = \vec{E}_A + \vec{E}_{arm}$$

$$E_{arm} = -jX_{arm} I_A$$

$$E_r = E_A - jX_{arm} \cdot I_A$$

I_A → Corrente no circuito de armadura



Considerando os efeitos da dispersão do fluxo:

$$V_T = E_R - I_A X_l$$

$$V_T = E_A - I_A \cdot jX_{arm} - jX_l \cdot I_A$$

↳ Representa as perdas devido ao fluxo de dispersão

Considerando a resistência da armadura (estator):

$$V_T = E_A - I_A \cdot jX_{arm} - jX_l \cdot I_A - R_A \cdot I_A$$

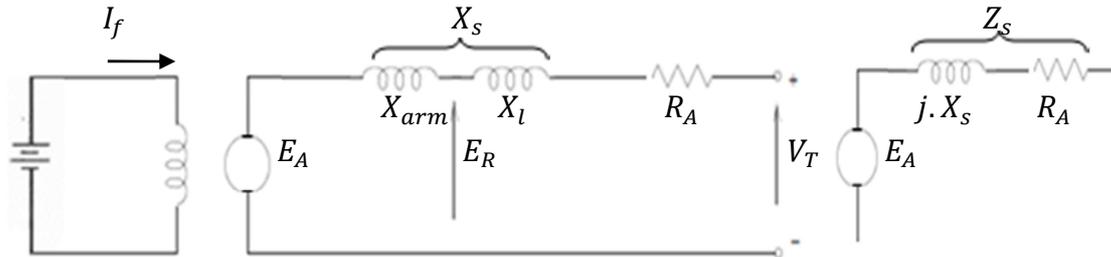
X_{arm} = Reatância proporcional à reação de armadura

X_l = Reatância de dispersão

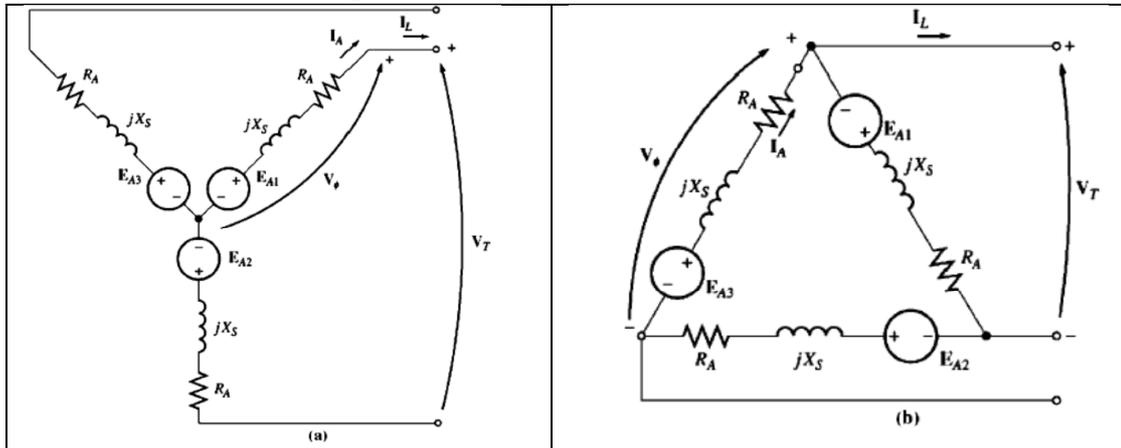
R_A = Resistência de armadura

$$V_T = E_A - j(X_{arm} + X_l) \cdot I_A - R_A \cdot I_A$$

$$V_T = E_A - j \cdot X_S \cdot I_A - R_A \cdot I_A$$



Os terminais das bobinas podem ser ligados em Y ou Δ



$$Y \rightarrow V_L = \sqrt{3} \cdot E_{Afase}$$

$$\Delta \rightarrow V_L = E_{Afase}$$