

Máquinas Elétricas



Máquinas Síncronas

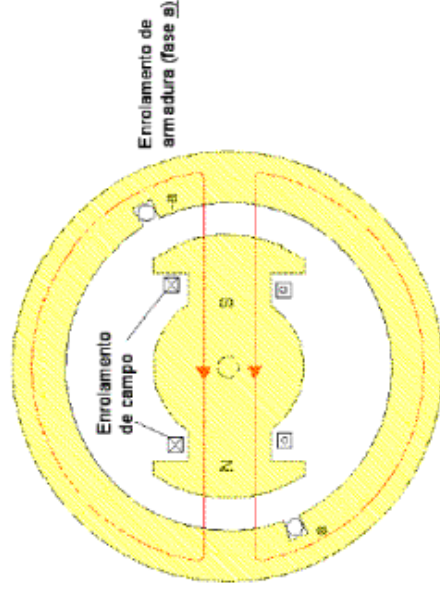
Máquinas Elétricas



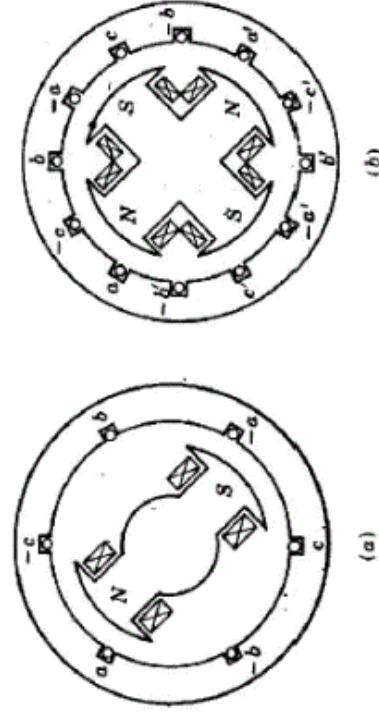
Geradores Síncronos

Formas construtivas

- Enrolamento de Armadura no estator e Campo no rotor;
- Enrolamento de Campo excitado por corrente contínua através de *escovas estacionárias* (de carvão) que fazem contatos com *anéis coletores*.



Máquina Síncrona
Elementar de
pólos salientes

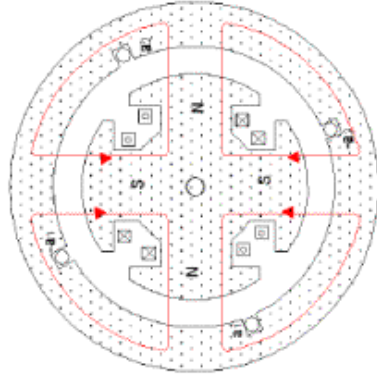


a) Máquina Síncrona trifásica de 2 pólos

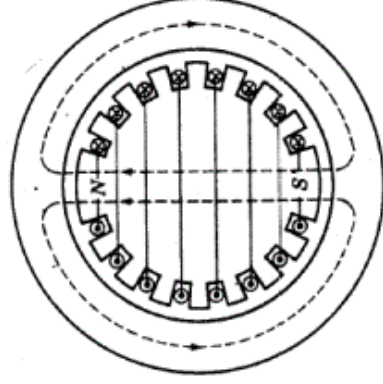
b) Máquina Síncrona trifásica de 4 pólos

Tipos de rotores

- Pólos Salientes:



- Pólos Lisos:



Princípio de Funcionamento

- Alimenta-se o enrolamento de campo com corrente contínua. A fonte desta corrente é conhecida por excitatriz e pode ser uma bateria (ou fonte estática) ou um gerador de corrente contínua que geralmente é montado no próprio eixo da máquina síncrona.
- Uma fonte de potência mecânica aciona o rotor, imprimindo neste uma velocidade constante que, pelo princípio da indução eletromagnética, induz uma tensão alternada de frequência diretamente relacionada à velocidade do rotor e amplitude relacionada à excitação do enrolamento de campo.

Tensões Geradas

Os enrolamentos de armadura são normalmente distribuídos deslocados de 120° **no espaço** ao longo do estator. Assim, as forças eletromotrizes (FEM) induzidas em cada enrolamento ocorrerão deslocadas **no tempo** de 120° .

Sistema de tensões trifásicas equilibradas e simétricas gerada:

$$e_A(t) = V_M \cos(\omega t)$$

$$e_B(t) = V_M \cos(\omega t + 120^\circ)$$

$$e_C(t) = V_M \cos(\omega t + 240^\circ) \quad \text{ou} \quad e_C(t) = V_M \cos(\omega t - 120^\circ)$$

Tensões Geradas

Exemplo de simbologia:

Tensões no tempo:

$$e_A(t) = 220 \cos(\omega t) \text{ V}$$

$$e_B(t) = 220 \cos(\omega t + 120^\circ) \text{ V}$$

$$e_C(t) = 220 \cos(\omega t + 240^\circ) \text{ V}$$

Fasores:

$$220 \angle 0^\circ \text{ V}$$

$$220 \angle 120^\circ \text{ V}$$

$$220 \angle 240^\circ \text{ V}$$

Relações

$$\theta_e = \frac{P}{2} \theta_g$$

Graus elétricos e Graus Geométricos

θ_e = graus elétricos

θ_g = graus geométricos

P = nº pólos

$$f = \frac{P}{2} \frac{n}{60} = \frac{pn}{60}$$

Frequência

f = frequência da tensão gerada (Hz)

n = rotação (rpm)

P = nº pólos

p = nº pares de pólos

Exemplo

Um gerador síncrono opera com rotação de 3600 rpm. Sabe-se que o gerador possui 1 par de pólos. Qual a frequência da tensão gerada?

$$f = (n \cdot p) / 60$$

$$f = (3600 \cdot 1) / 60$$

$$f = 60 \text{ Hz}$$

Exercício

Considere um gerador síncrono operando com rotação de 1500 rpm. Sabe-se que o gerador possui 4 pólos. Qual a frequência da tensão gerada?

Exercício

Considere um gerador síncrono operando com rotação de 1500 rpm. Sabe-se que o gerador possui 4 pólos. Qual a frequência da tensão gerada?

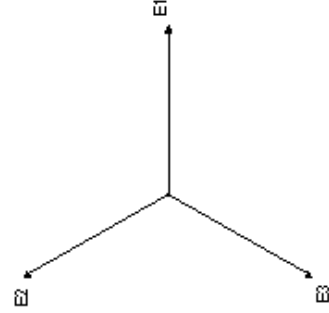
$$f = (n \cdot p) / 60$$

$$f = (1500 \cdot 2) / 60$$

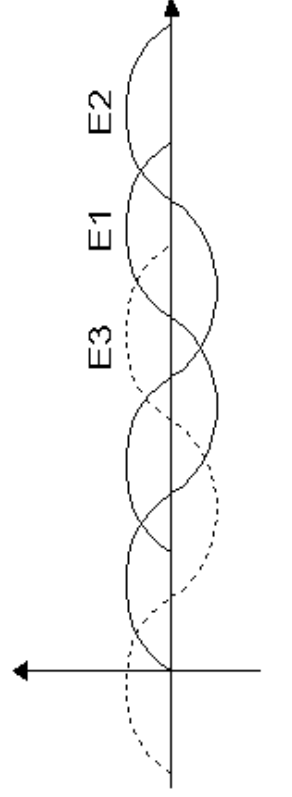
$$f = 50 \text{ Hz}$$

Tensões Trifásicas

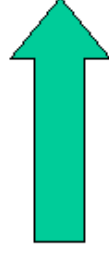
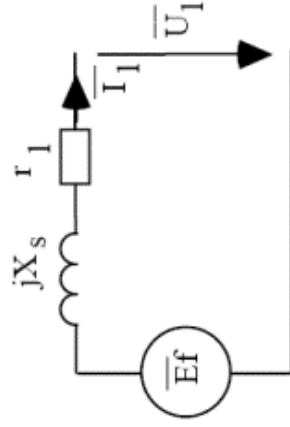
Representação vetorial



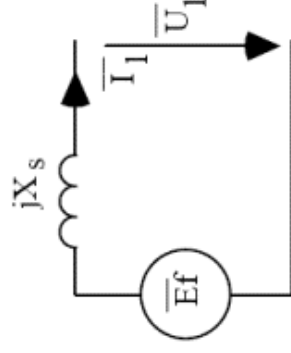
Representação no geométrica



Circuito Equivalente



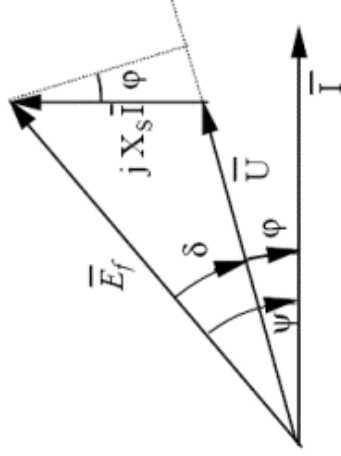
Como $X_s \gg r_1$ é
válido desprezar a
resistência dos
enrolamentos no
cálculo das correntes



Equação Válida

$$\bar{E}_f = jX_s \bar{I} + \bar{U}$$

A equação pode ser representada na forma vetorial:



Análise Vetorial

φ - ângulo entre $\bar{U}$ e $\bar{I}$

ψ - ângulo entre $\bar{E}_f$ e $\bar{I}$ (Ângulo interno de defasagem)

δ - ângulo de potência ou de carga $\bar{E}_f$ e $\bar{U}$

Tem-se:

$$\psi = \varphi + \delta$$

e pode-se escrever

$$\begin{aligned} P &= 3 UI \cos \varphi \\ \bar{Q} &= 3 UI \sin \varphi \end{aligned}$$

notando que

$$U \cos \varphi = E_f \cos \psi$$

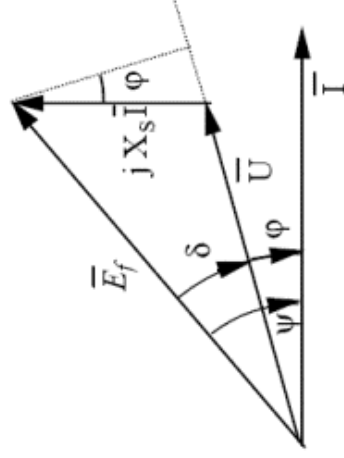
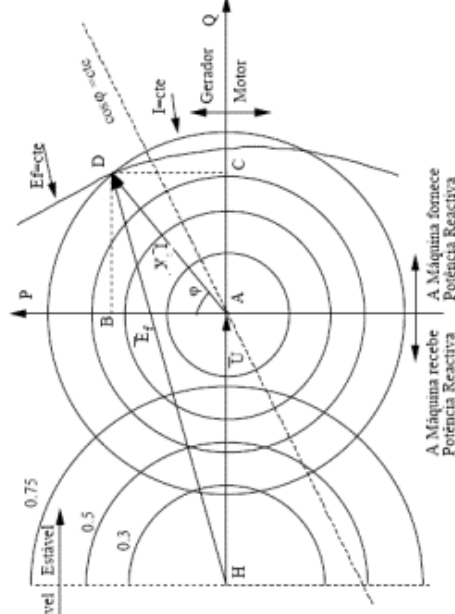


Diagrama de Potências

- Lugar geométrico dos pontos correspondentes a corrente de excitação constante (circunferência de centro H)
- Lugar geométrico dos pontos correspondentes a corrente no induzido constante (circunferência de centro A)
- Lugar geométrico dos pontos correspondentes a fator de potência constante (reta passando por A)
- Limite de estabilidade
- Quadrantes de funcionamento



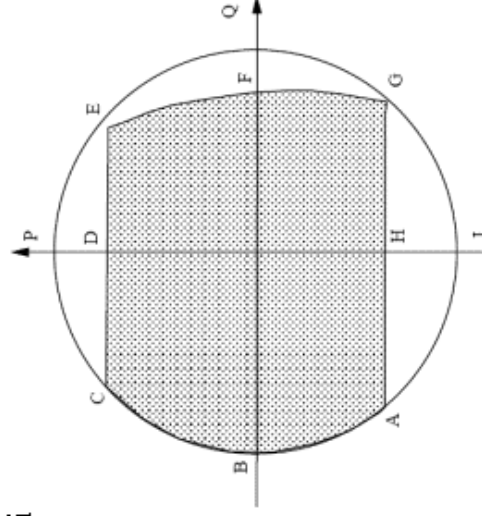
Curva de Capabilidade

ABC – limite de corrente nominal do induzi

CDE – limite de potência máxima da máquina motriz (gerador)

EFG – limite de corrente de excitação

GHA – limite de carregamento que pode receber (motor)



Gerador Independente X Barramento Infinito

Quando opera individualmente as alterações na velocidade do rotor refletem totalmente na frequência da tensão gerada, bem como a alteração na corrente de excitação reflete alterações na amplitude das tensões.

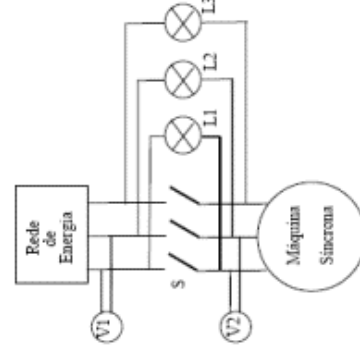
Quando conectado ao barramento infinito, a frequência e tensão passam a serem fixas (dentro de certo limite) pois o barramento infinito é um sistema muito mais robusto que o gerador individual e é caracterizado por $f = \text{cte}$ e $V = \text{cte}$.

Condições para Paralelismo

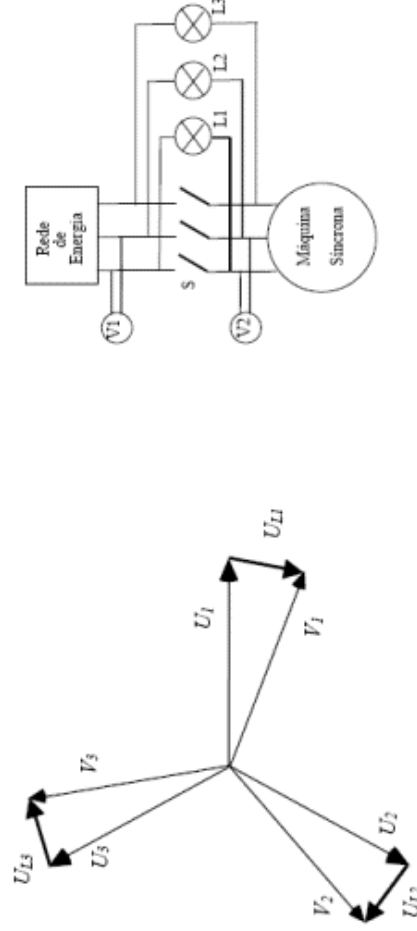
Existem 3 condições básicas:

- Mesma amplitude das tensões;
- Mesma frequência das tensões;
- Sincronismo (mesma defasagem).

Ao lado uma montagem possível para garantir as condições de paralelismo.



Condições para Paralelismo



Relações de Potências

Quando uma máquina síncrona está conectada ao barramento infinito, os fluxos de potência ativa e reativa podem ser manipulados com alteração da velocidade de rotação e corrente de excitação.

Velocidade de Rotação:

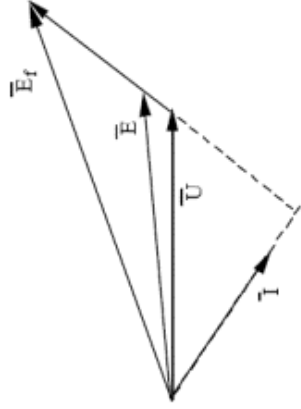
- Fornecer mais velocidade = Funcionamento como gerador (fornece potência ativa);
- Retirar velocidade = Funcionamento como motor (consome potência ativa).

Relações de Potências

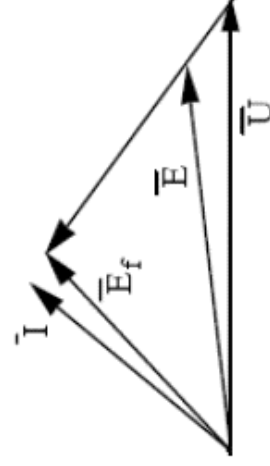
Corrente de Excitação:

- Sobre Excitar = Funcionamento como gerador de potência reativa indutiva (indutor síncrono);
- Sub Excitar = Funcionamento como gerador de potência reativa capacitiva (capacitor síncrono).

Relações de Potências

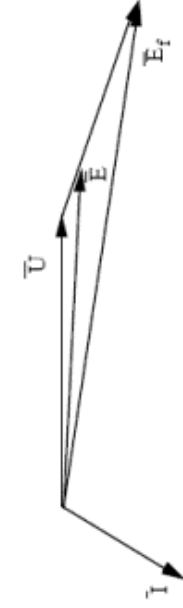


Gerador Sobre-excitado ($P>0$, $Q>0$)

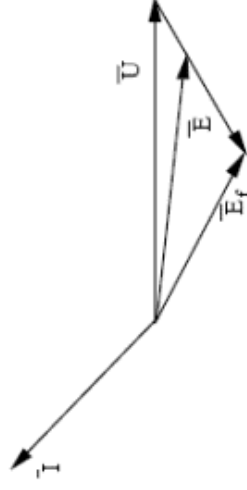


Gerador Sub-excitado ($P>0$, $Q<0$)

Relações de Potências



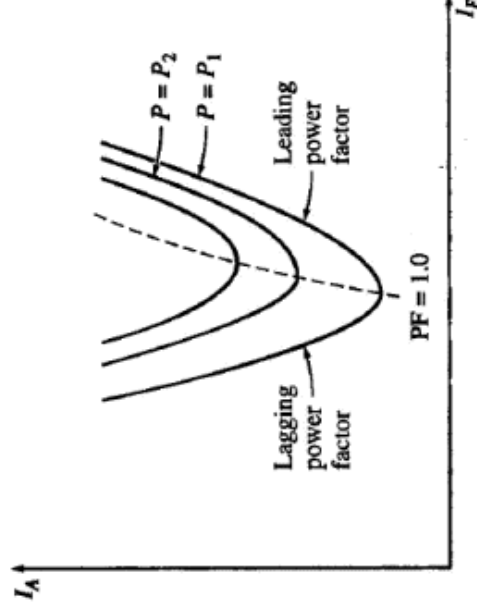
Motor Sobre-excitado ($P < 0$, $Q > 0$)



Motor Sub-excitado ($P < 0$, $Q < 0$)

Curvas V

Em um gerador síncrono, para uma dada potência ativa de carga, o fator de potência com o qual a máquina síncrona opera e consequentemente a sua corrente de armadura pode ser controlado ajustando a corrente de excitação do campo. A curva que mostra a relação entre as correntes de armadura e campo, para uma tensão terminal e potência ativa constantes é conhecida como curva V.



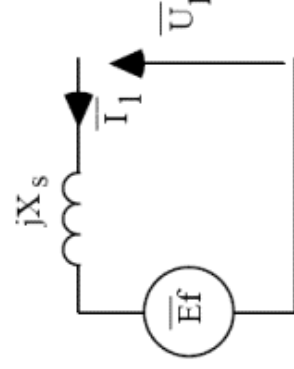
Motores Síncronos

Motores Síncronos

As principais características dos motores síncronos são a garantia de velocidade constante (máquinas síncronas) e possibilidade de controle do fator de potência.

Circuito Equivalente

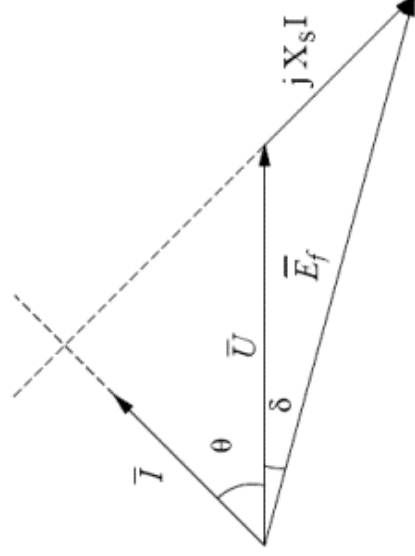
É idêntico ao circuito da máquina síncrona atuando como gerador, realizando-se somente a inversão do sentido da potência e da corrente.



Equação e Diagrama

$$\bar{E}_f = \bar{U} - jX_s \bar{I}$$

A equação pode ser representada na forma vetorial:



Partida de Motores Síncronos

- O Motor síncrono não possui conjugado de partida e deve ser acionado por um método auxiliar para iniciar seu movimento:
- Reduzir a velocidade de sincronismo para valores suficientemente baixos para que o binário oscilante consiga arrancar o motor. Isto pode ser feito com um inversor de frequência.
 - Através de um motor de arranque externo, procedendo tal como se tratasse de um gerador. Após interligado, desliga-se o motor de arranque e a máquina síncrona passa a consumir potência elétrica para manter a velocidade.
 - Usando um arranque assíncrono. Deve-se curto-circuitar o enrolamento rotórico e alimentar normalmente o estator. A partida deve ser realizada sem carga.

Correção de Fator de Potência Condensador Síncrono

Através do controle da excitação do rotor, o motor síncrono pode ser utilizado como um corretor de fator de potência.

Máquinas Elétricas



FIM