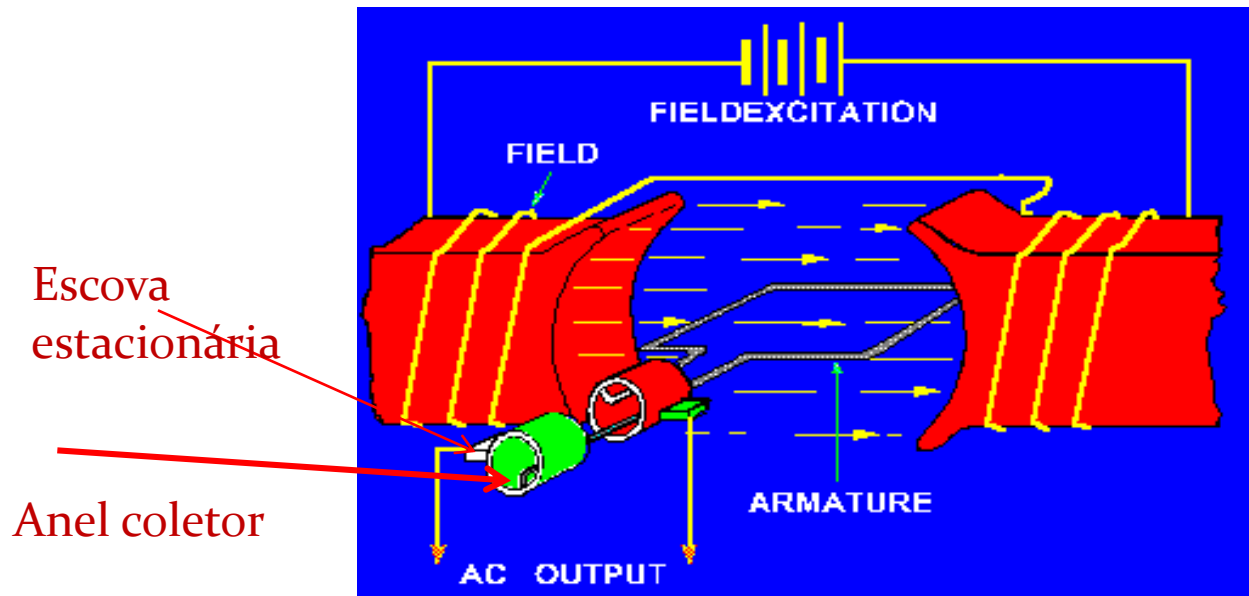


MÁQUINA SÍNCRONA

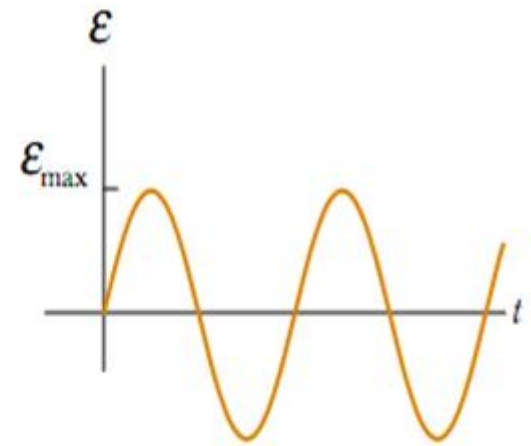
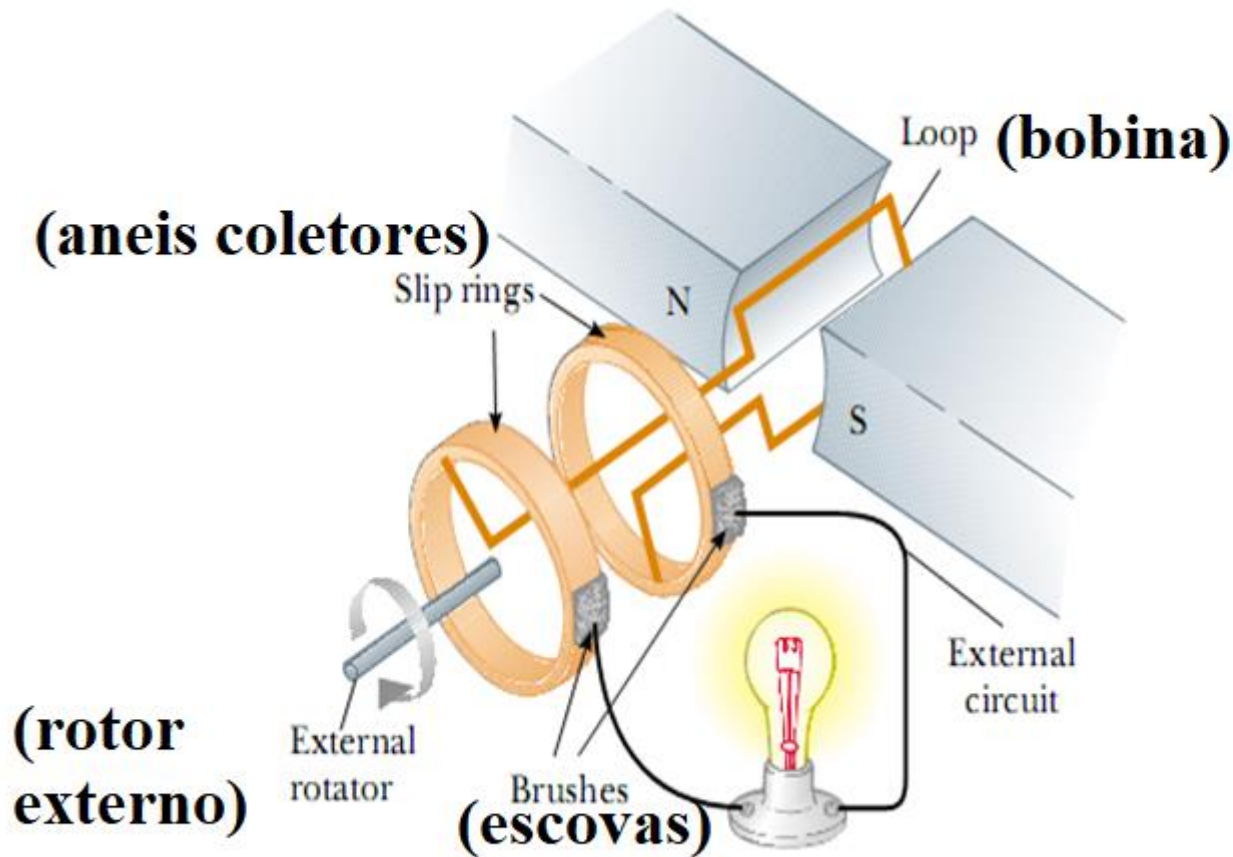
FUNDAMENTOS DE MÁQUINAS SÍNCRONAS

1. Máquina síncrona de campo fixo

De forma semelhante às máquinas de corrente contínua, o enrolamento de campo é excitado por uma fonte CC. O enrolamento de armadura colocado no rotor é levado a anéis coletores, por onde se tem a saída em tensão alternada, caso a máquina funcione como gerador ou a entrada em corrente alternada caso a máquina funcione como motor.



MÁQUINA SÍNCRONA



MÁQUINA SÍNCRONA

Suponha que a espira gira no interior do campo magnético B , com velocidade constante ω . Se θ é o ângulo entre a normal ao plano da espira e as linhas de campo magnético, então o fluxo magnético através da espira em qualquer tempo t é:

$$\Phi = BA \cos(\theta) = BA \cos(\omega t)$$

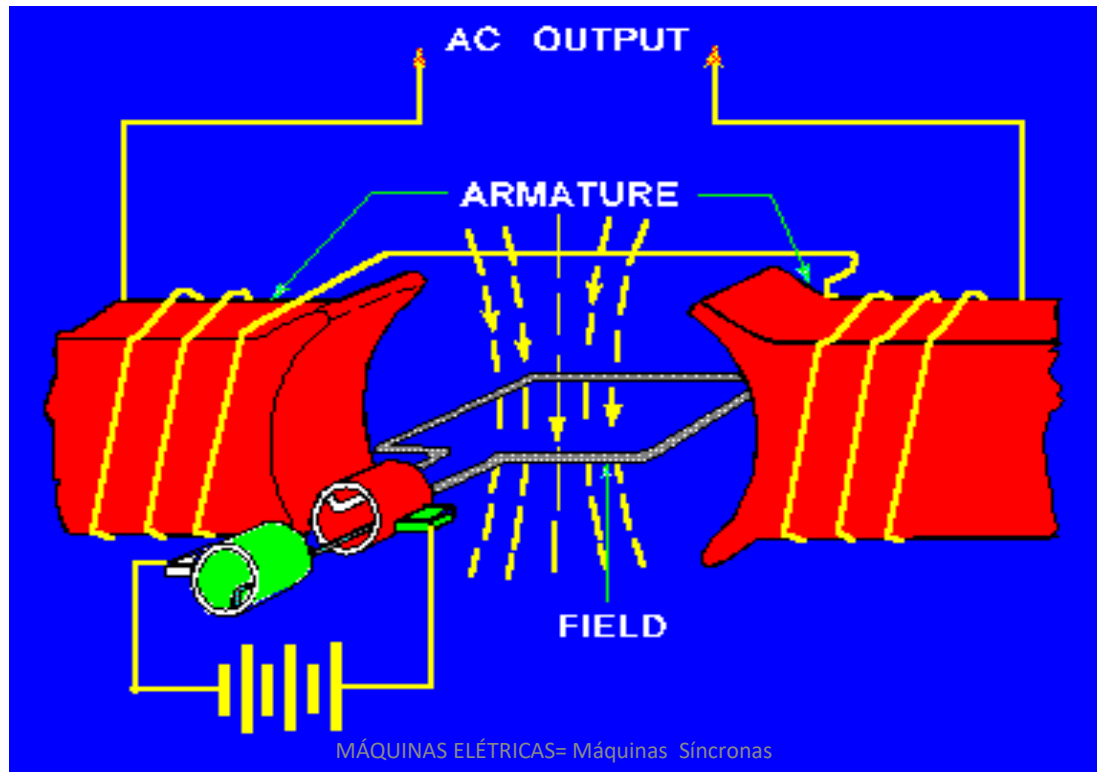
A força eletromotriz induzida na bobina é:

$$e_{\text{ind}} = -N \frac{d}{dt} \Phi(t) = NBA\omega \sin(\omega t)$$

MÁQUINA SÍNCRONA

1. Máquina síncrona de campo móvel

Nesta máquina o enrolamento de campo é colocado no rotor e o enrolamento de armadura é colocado no estator. Nesta máquina, o enrolamento de campo é alimentado por uma fonte CC através de dois anéis coletores e à armadura é ligada diretamente à carga ou a fonte polifásica CA.



MÁQUINA SÍNCRONA

Excitatrizes: Pequeno gerador CA montado no mesmo eixo do gerador principal cujo objetivo é alimentar o enrolamento de campo da máquina principal. A excitatriz é um gerador cujo o enrolamento de campo é fixo e a armadura é móvel.

Frequência das máquinas síncronas CA

A fem gerada no enrolamento de armadura estacionária muda de direção a cada meia revolução do rotor de dois polos. Uma revolução completa produzirá um ciclo completo da onda de tensão senoidal gerada. A frequência da tensão gerada é:

$$f = \frac{PN}{60}$$

f= frequência em Hz
P= número de polos
N= velocidade de rotação em rpm

MÁQUINA SÍNCRONA

Vantagens da utilização de armadura estacionária e campo girante

A maior parte dos geradores de energia em corrente alternada utilizam armadura estacionária e campo girante.

- a) **Reatância da armadura reduzida:** A armadura estacionária apresenta uma relutância reduzida ao fluxo. Isto ocorre devido a seção transversal de ferro maior. A relutância reduzida também reduz a quantidade de fluxo disperso produzido pela armadura.
- b) **Em grandes estatores polifásicos o enrolamento da armadura é mais complexo que o enrolamento de campo.** As várias bobinas e interligações entre as fases podem ser construídas mais facilmente numa estrutura estacionária rígida que num rotor.
- c) **Melhoria do isolamento:** É mais fácil isolar um membro estacionário que um rotativo. Uma vez que o rotor está aterrado, isolar o campo CC de **baixa tensão é mais fácil que isolar uma armadura rotativa de alta tensão.**

MÁQUINA SÍNCRONA

Vantagens da utilização de armadura estacionária e campo girante

- d) Número necessário de anéis coletores isolados:
 - i. Para o caso de uma armadura rotativa, seriam necessários três anéis coletores para um gerador trifásico.
 - ii. Haveria problemas no momento de transferir altas tensões, por exemplo 13200 V/fase em altas correntes dos anéis coletores da armadura para as escovas estacionárias em contato com estes anéis.
 - iii. Isolar do eixo os anéis coletores é um problema.
 - iv. Apenas dois anéis coletores são necessários para excitar o enrolamento de campo a uma tensão comparativamente baixa.

- e) Peso e inércia do rotor reduzidos: O enrolamento de campo construído no rotor é mais que o enrolamento da armadura.

MÁQUINA SÍNCRONA

Máquinas primárias

O acionamento dos geradores trifásicos de corrente alternada (alternadores) pode ser feito de várias formas: turbina a vapor, motor a diesel, turbina hidráulica, turbina a gás. Com base nesse aspecto, existem dois tipos de rotores:

- a) **Rotores de polos não salientes ou cilíndricos:** utilizados em alternadores de alta velocidade. Menor quantidade de pol. Eles possuem uma pequena circunferência quando comparados aos rotores de pólos salientes. Possuem grande comprimento axial.
- b) **Rotores de polos salientes:** Empregados em alternadores de velocidade média ou baixa. No caso de uma turbina hidráulica, os alternadores requerem uma grande quantidade de pólos. Possuem pequeno comprimento axial, mas com armadura do estator de grande circunferência.

MÁQUINA SÍNCRONA

ALGUNS ROTORES



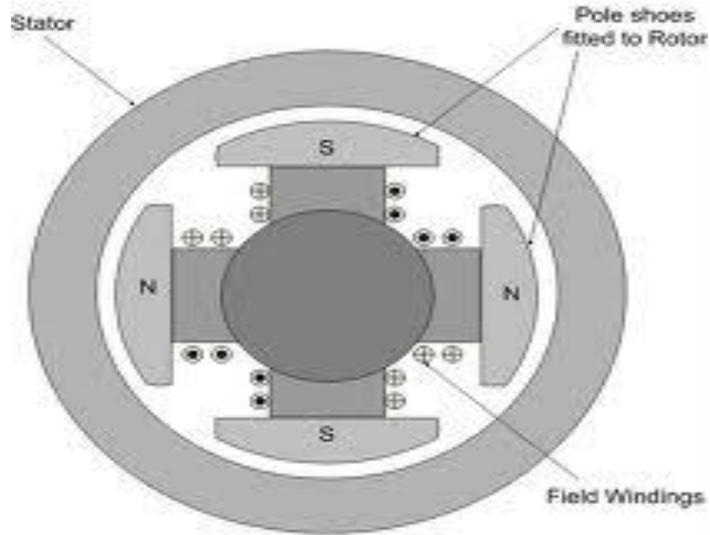
Rotor de polos salientes



Rotor de polos cilíndricos

MÁQUINA SÍNCRONA

ALGUNS ROTORES



A salient 4-pole Generator. Carefully observe the location of North & South poles

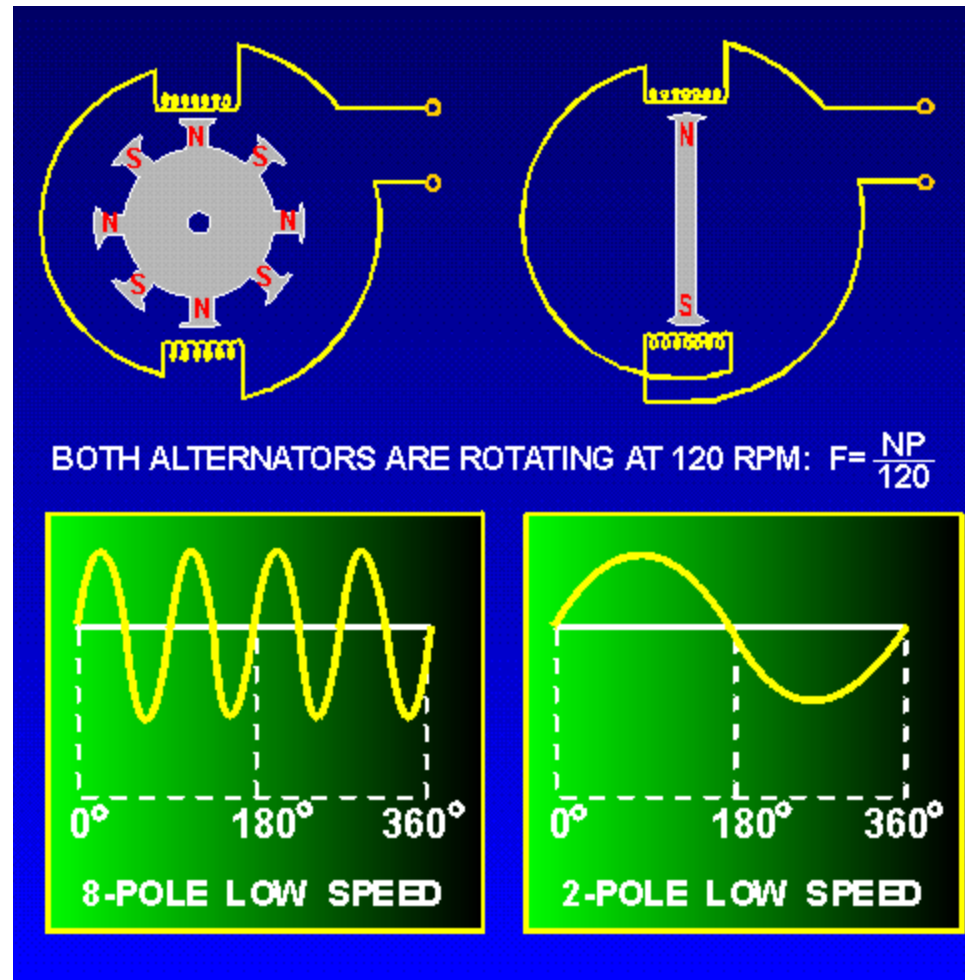
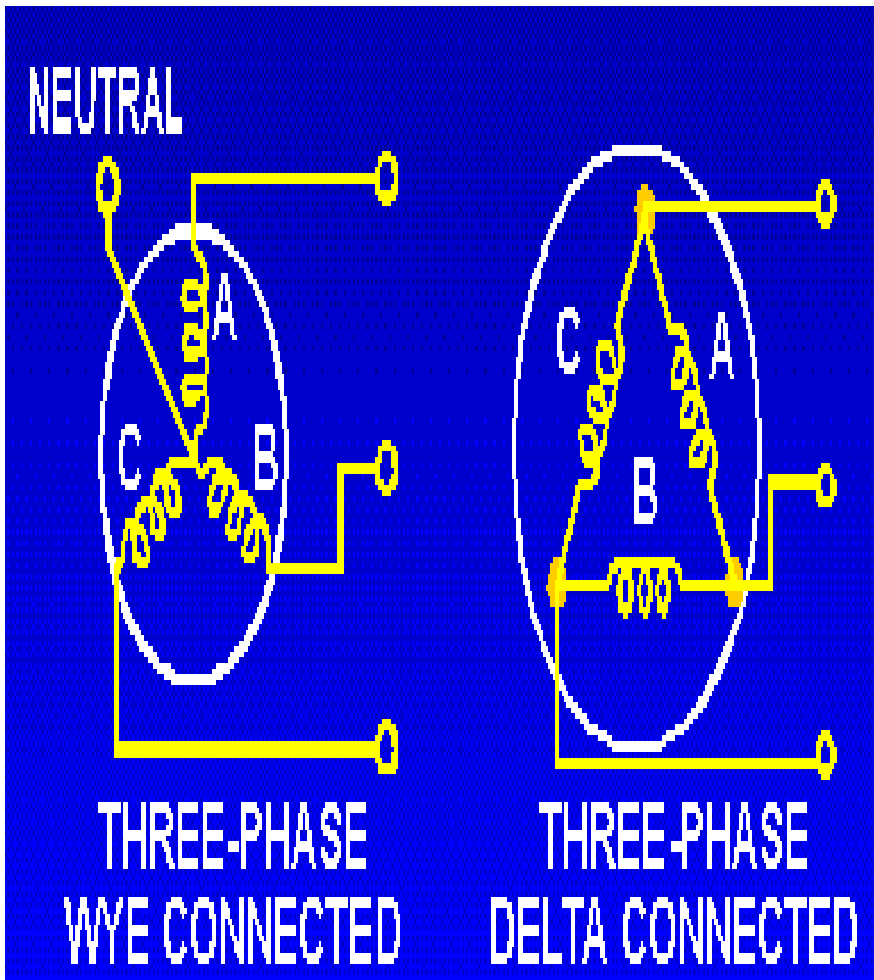
Rotor de polos salientes



Rotor de polos cilíndricos

MÁQUINA SÍNCRONA

Conexões do estator (Trifásica)



MÁQUINA SÍNCRONA

PONTOS PRINCIPAIS

- i. A máquina gira numa velocidade constante em regime permanente.
- ii. Ao contrário da máquina de indução, o campo girante do air gap (entreferro) e o rotor giram na mesma velocidade, denominada de velocidade síncrona.
- iii. Máquinas síncronas são usadas principalmente como geradores de energia elétrica. Neste caso são chamados de geradores síncronos ou alternadores.
- iv. Gerador síncrono é principal equipamento de conversão de energia no sistema de potência elétrico mundial.
- v. Como muitas máquinas rotativas, a máquina síncrona pode como gerador ou como motor.
- vi. Os motores síncrono são utilizados em grandes estações de bombeamento.
- vii. Na indústria, motores síncronos são muitos utilizados onde a velocidade constante é desejada.

MÁQUINA SÍNCRONA

PONTOS PRINCIPAIS

- ❖ A máquina síncrona é tipo duplamente excitada.
- ❖ Uma característica do motor síncrono é que ele pode operar com fator de potência variável, em avanço ou em atraso. Isto pode ser feito a partir do ajuste do valor da corrente de campo.
- ❖ Para o motor síncrono, os polos do rotor são excitados por uma fonte CC e o enrolamento do estator é conectado a uma fonte de suprimento CA.
- ❖ O fluxo resultante no air gap é resultante dos fluxos devido as correntes do rotor e do estator.
- ❖ Uma máquina síncrona sem carga é denominada de capacitor síncrono. Pode ser usada em linhas de transmissão para regulação de tensão de linha.

MÁQUINA SÍNCRONA

GERADORES SÍNCRONOS (ALTERNADORES)

Tensão interna gerada

A tensão induzida no estator por fase é dada por:

$$E_f = 4,44fN\Phi K_w$$

Supondo o enrolamento de campo no rotor (algo comum) sendo alimentado por corrente contínua. O rotor é acionado por uma máquina primária (que pode ser uma turbina hidráulica, motor a diesel) e um campo magnético girante é estabelecido no entreferro (air gap). Este campo é denominado de campo de excitação por que é produzido pela corrente de campo.

Nos enrolamentos do estator defasados de 120 graus no espaço serão produzidas três tensões de mesma amplitude, porém defasadas de 120 graus entre si. Elas são denominadas de *tensão de excitação*.

MÁQUINA SÍNCRONA

GERADORES SÍNCRONOS (ALTERNADORES)

A tensão interna gerada ou tensão de excitação depende da velocidade de acionamento da máquina primária e do fluxo.

Uma maneira mais simples da fórmula anterior é:

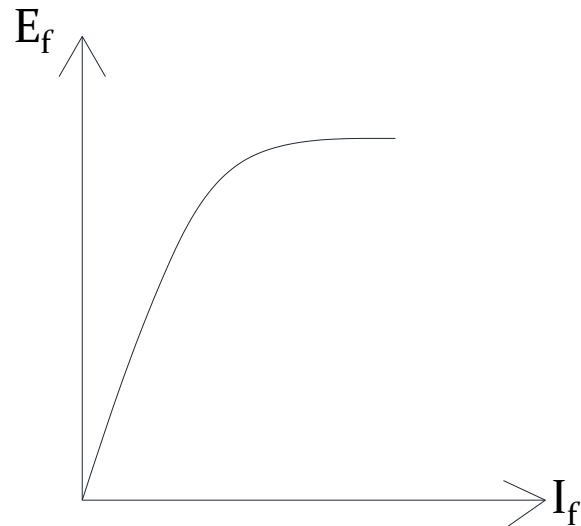
$$E_f = K' \Phi \omega$$

A variação da tensão interna gerada com a corrente de campo é fornecida por uma curva denominada de *curva de magnetização ou característica de circuito aberto da máquina*.

MÁQUINA SÍNCRONA

GERADORES SÍNCRONOS (ALTERNADORES)

Curva de magnetização



MÁQUINA SÍNCRONA

GERADORES SÍNCRONOS (ALTERNADORES)

Circuito equivalente

A tensão interna gerada produzida em uma fase do gerador não é que sempre aparece nos terminais do gerador.

A tensão de saída somente é igual a tensão interna gerada na condição sem carga.

O modelo através do circuito equivalente deve ser capaz de reproduzir essa diferença.

MÁQUINA SÍNCRONA

GERADORES SÍNCRONOS (ALTERNADORES)

Existe um grande número de fatores que causa essa diferença:

- ❖ A distorção do campo magnético no air gap pela corrente fluindo no estator chamada de reação de armadura;
- ❖ A indutância própria das bobinas de armadura;
- ❖ A resistência das bobinas da armadura;
- ❖ O efeito da forma do rotor de polos salientes.

OBS: Inicialmente abordaremos o desempenho em regime permanente da máquina síncrona de polos cilíndricos. Uma abordagem diferente se faz necessária para o caso da máquina síncrona com rotor do tipo saliente. Esse tipo de rotor apresenta air gap não uniforme.

MÁQUINA SÍNCRONA

GERADORES SÍNCRONOS (ALTERNADORES)

O principal efeito que ocorre na máquina síncrona é denominado de reação de armadura.

EXPLICAÇÃO:

Quando um gerador é acionado por uma máquina primária, uma tensão E_f é induzida nos enrolamentos do estator. Se uma carga é conectada nos terminais do gerador, uma corrente flui. Mas, correntes trifásicas fluindo produzirão seu próprio campo magnético na máquina. O campo magnético do estator distorce o campo magnético inicial do rotor, mudando a tensão de fase resultante.

Então o fluxo resultante no air gap é a resultante dos fluxos produzidos pela corrente do rotor I_f e pela corrente do estator I_a .

MÁQUINA SÍNCRONA

GERADORES SÍNCRONOS (ALTERNADORES)

Seja ϕ_f o fluxo devido a corrente de campo I_f e ϕ_a o fluxo devido à corrente que circula pelo enrolamento da armadura I_a , denominado de fluxo de reação de armadura.

Então:

$$\Phi_r = \Phi_f + \Phi_a$$

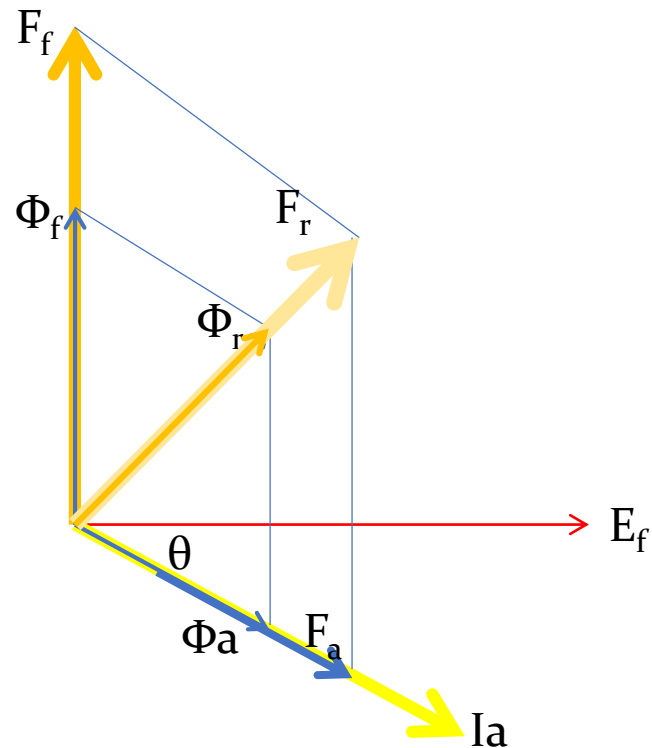
Onde Φ_r é o fluxo resultante no entreferro.

Tanto o fluxo resultante quanto os fluxos componentes giram no air gap com a mesma velocidade.

MÁQUINA SÍNCRONA

GERADORES SÍNCRONOS (ALTERNADORES)

DIAGRAMA FASORIAL



MÁQUINA SÍNCRONA

GERADORES SÍNCRONOS (ALTERNADORES)

Atenção as nomenclaturas:

A força magnetomotriz produzida pelo enrolamento de campo é F_f (devido à I_f) e o fluxo Φ_f produzido F_f são representados ao longo da mesma reta.

A tensão induzida E_f se atrasa em relação ao fluxo Φ_f por 90° . Assumindo que a corrente do estator I_a se atrasa em relação a tensão interna por um ângulo θ . A força magnetomotriz F_a devido à corrente de armadura I_a , e o fluxo Φ_a produzido por F_a na mesma direção da corrente I_a .

MÁQUINA SÍNCRONA

Modelo de circuito equivalente

A corrente I_f no enrolamento de campo produz um fluxo Φ_f no air gap. A corrente I_a no enrolamento de armadura produz o fluxo Φ_a . Parte deste fluxo, Φ_{1a} enlaça apenas o enrolamento do estator (enrolamento de armadura) é *denominado de fluxo de dispersão*.

A maior parte do fluxo Φ_a , denominado Φ_{ar} , *fluxo de reação de armadura* enlaça também o enrolamento de campo sendo estabelecido no air gap.

MÁQUINA SÍNCRONA

O fluxo resultante no air gap é a soma do fluxo produzido pelo enrolamento de campo e do fluxo de reação de armadura.

Cada componente do fluxo induz uma componente de tensão no enrolamento do estator.

$$\Phi_f \longrightarrow E_f$$

$$\Phi_{ar} \longrightarrow E_{ar}$$

$$\Phi_r \longrightarrow E_r$$

A tensão de excitação E_f pode ser encontrada a partir da curva de magnetização, enquanto a tensão E_{ar} depende do fluxo Φ_{ar} e portanto da corrente que circula pelo enrolamento da armadura.

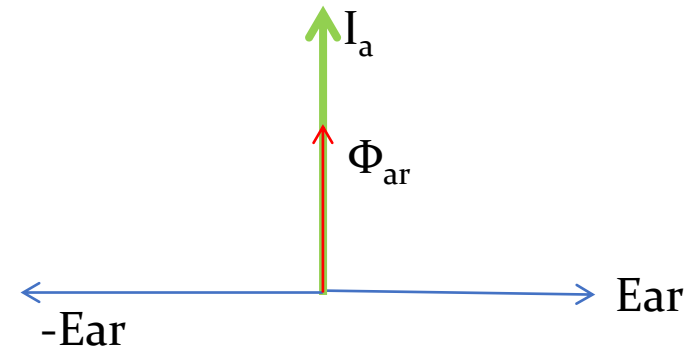
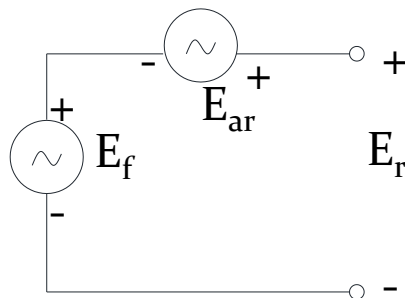
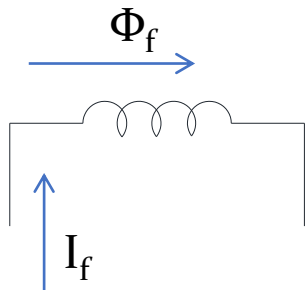
MÁQUINA SÍNCRONA

A tensão resultante é dada por:

$$E_r = E_f + E_{ar}$$

$$E_f = E_r - E_{ar}$$

Circuito equivalente inicial:



MÁQUINA SÍNCRONA

Do diagrama fasorial, tem-se que a tensão E_{ar} se atrasa em relação ao fluxo por 90° . A corrente I_a se atrasa em relação a $(-E_{ar})$ por 90° . A tensão $(-E_{ar})$ pode ser representada por uma queda de tensão através da reatância X_{ar} devido a corrente I_a .

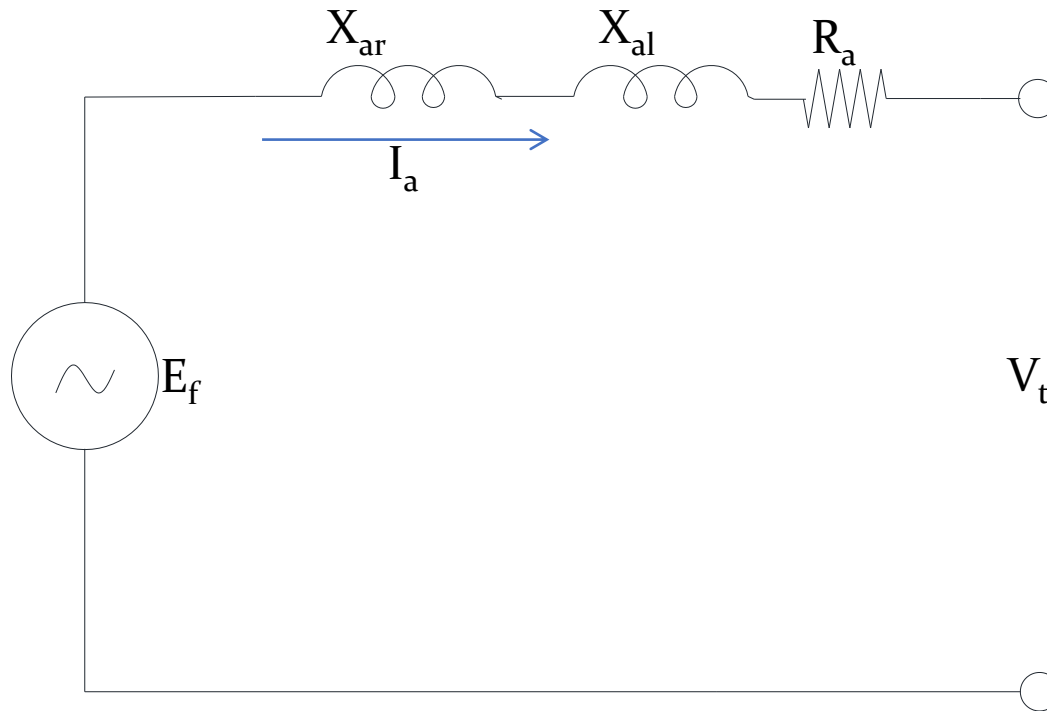
A equação para tensão interna gerada fica da seguinte maneira

$$E_f = I_a j X_{ar} + E_r$$

A reatância X_{ar} é conhecida como reatância de reação de armadura ou reatância de magnetização. Se a resistência do enrolamento do estator R_a e a reatância associada ao fluxo de dispersão X_{al} são incluídas, o circuito equivalente completo está no slide seguinte.

MÁQUINA SÍNCRONA

CIRCUITO EQUIVALENTE COMPLETO



MÁQUINA SÍNCRONA

DIFERENTES TIPOS DE REATÂNCIAS

Se as duas reatâncias X_{ar} e X_{al} forem combinadas resulta na reatância denominada de *reatância síncrona* (X_s).

$$X_s = X_{ar} + X_{al} \quad \longrightarrow \quad \text{REATÂNCIA SÍNCRONA}$$

$$Z_s = R_a + jX_s \quad \longrightarrow \quad \text{IMPEDÂNCIA SÍNCRONA}$$

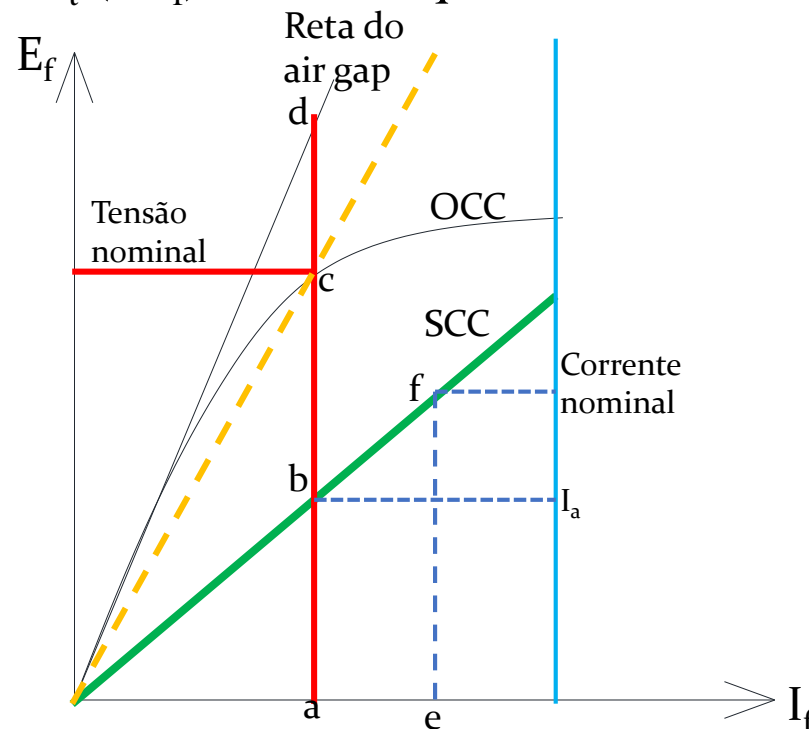
A reatância síncrona leva em consideração todos os fluxos, o de magnetização quanto o de dispersão produzido pela armadura.

MÁQUINA SÍNCRONA

DETERMINAÇÃO DA REATÂNCIA SÍNCRONA (X_s)

Teste de circuito aberto

A máquina síncrona é acionada na velocidade síncrona e a tensão terminal de circuito aberto é medida $V_t (=E_f)$ à medida que a corrente de campo é variada.



MÁQUINA SÍNCRONA

Teste de curto-circuito

A máquina síncrona é acionada na velocidade síncrona e a corrente de campo é variada e as correntes de armadura que circulam nas três fases são medidas.

A variação da corrente de armadura com a corrente de campo é mostrada na *característica de curto-circuito* (SCC).

A forma dessa característica é uma linha reta, pois em condição de curto-circuito o fluxo no air-gap permanece em um nível baixo.

MÁQUINA SÍNCRONA

Reatância síncrona não saturada

Pode ser obtida da tensão correspondente a reta do air gap e da corrente de curto-circuito da máquina para um valor particular da corrente de campo.

$$Z_{s(\text{nao-sat})} = \frac{E_{da}}{I_{ba}} = R_a + jX_{s(\text{nao-sat})}$$

Se R_a for desprezada, então:

$$X_{s(\text{nao-sat})} = \frac{E_{da}}{I_{ba}}$$

MÁQUINA SÍNCRONA

Reatância síncrona saturada

Sabe-se que antes de conectar uma máquina síncrona a uma barra infinita sua tensão de excitação deve ser elevada até o valor nominal. Na figura do slide

29 a tensão assume o valor E_{ca} e a máquina opera com algum nível de saturação.

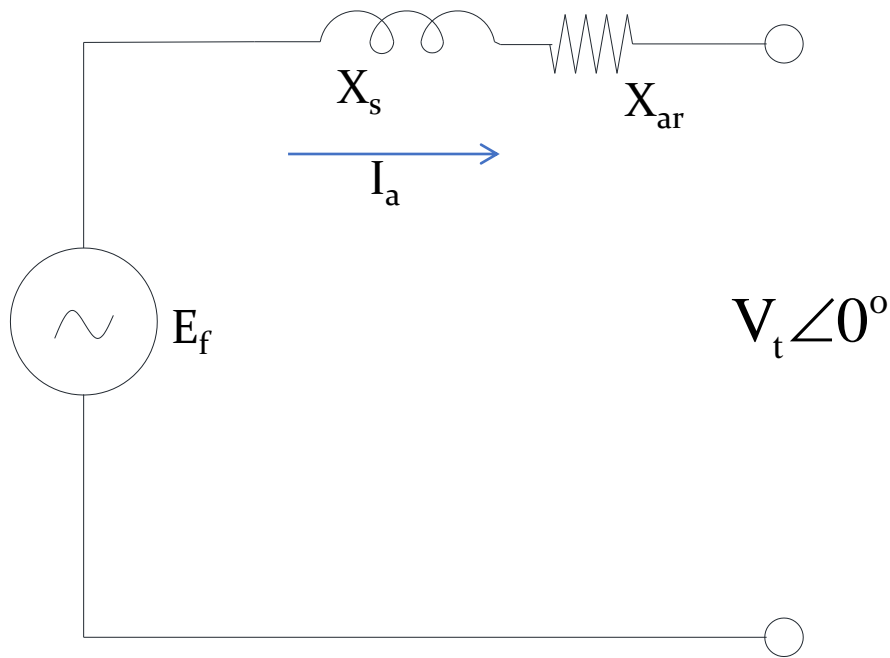
A reatância síncrona saturada na tensão nominal é obtida por:

$$Z_{s(\text{sat})} = \frac{E_{ca}}{I_{ba}} = R_a + jX_{(\text{sat})}$$

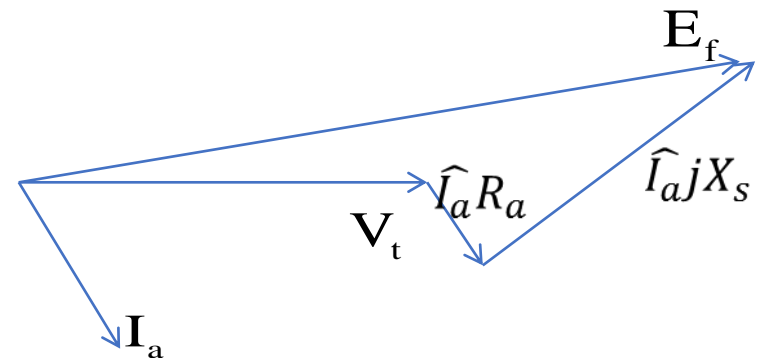
MÁQUINA SÍNCRONA

Diagrama fasorial

GERADOR SÍNCRONO



$$E_f = V_t + I_a R_a + I_a j X_s = |E_f| \angle \delta$$

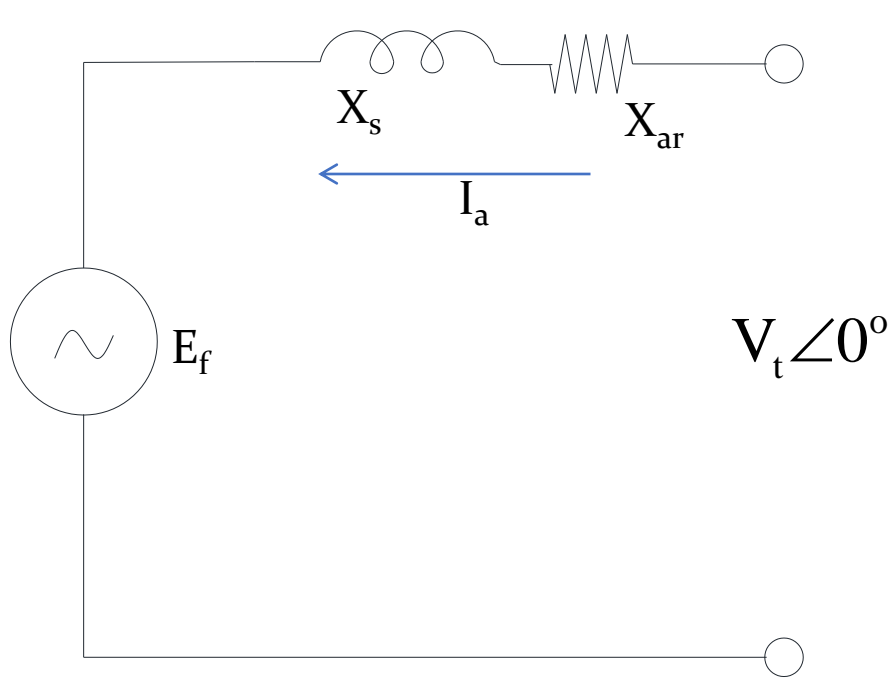


δ – ângulo entre E_f e V_t

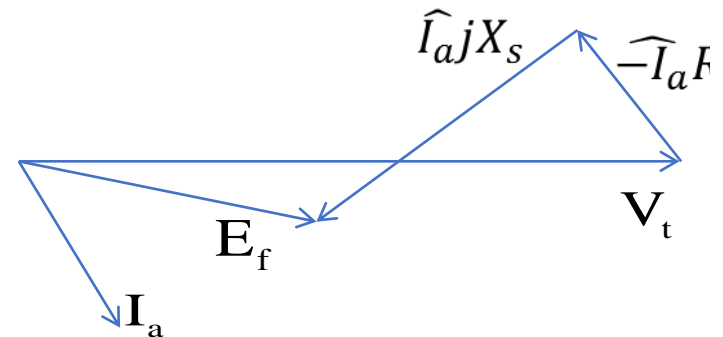
MÁQUINA SÍNCRONA

Diagrama fasorial

MOTOR SÍNCRONO



$$E_f = V_t - I_a R_a - I_a j X_s = |E_f| \angle -\delta$$



δ – ângulo entre E_f e V_t

MÁQUINA SÍNCRONA

CARACTERÍSTICA DE POTÊNCIA E TORQUE

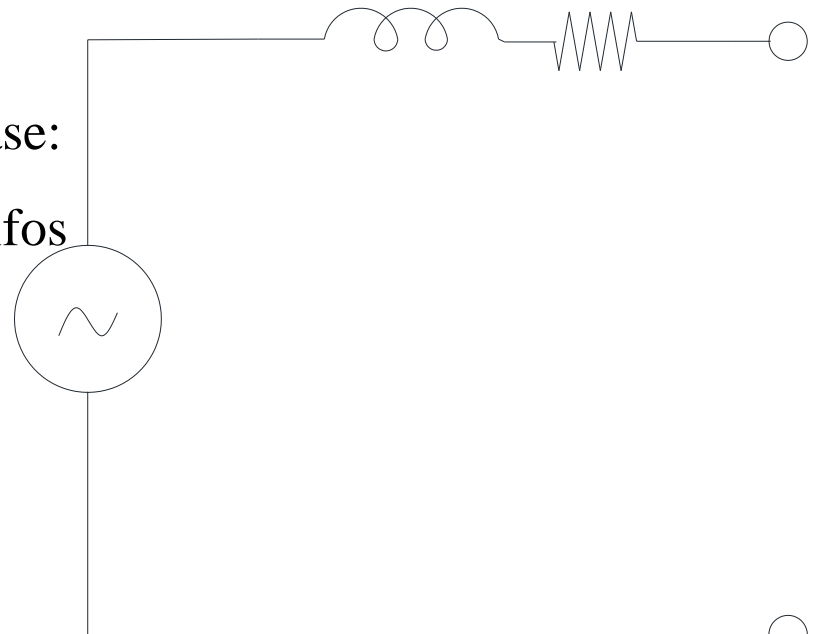
Uma máquina síncrona é normalmente conectada a um barramento de tensão fixa e opera com velocidade constante.

Existe um limite na potência que é um gerador síncrono pode fornecer a uma barra infinita e o torque que pode ser aplicado a um motor síncrono sem perda de sincronismo.

Considere o circuito equivalente por fase:

Os parâmetros do circuito foram definidos

Anteriormente.



MÁQUINA SÍNCRONA

CARACTERÍSTICA DE POTÊNCIA E TORQUE

$$\mathbf{V}_t = |\mathbf{V}_t| \angle 0^\circ$$

$$\mathbf{E}_f = |\mathbf{E}_f| \angle \delta$$

$$\mathbf{Z}_s = \mathbf{R}_a + j\mathbf{X}_s = |\mathbf{Z}_s| \angle \theta_s$$

A potência complexa por fase S nos terminais é:

$$\mathbf{I}_a^* = \left(\frac{\mathbf{E}_f - \mathbf{V}_t}{\mathbf{Z}_s} \right)^* = \left\{ \frac{(\mathbf{E}_f - \mathbf{V}_t)^*}{\mathbf{Z}_s^*} \right\} = \frac{\mathbf{E}_f^*}{\mathbf{Z}_s^*} - \frac{\mathbf{V}_t^*}{\mathbf{Z}_s^*}$$

MÁQUINA SÍNCRONA

CARACTERÍSTICA DE POTÊNCIA E TORQUE

$$\mathbf{I}_a^* = \frac{|\mathbf{E}_f| \angle -\delta}{|\mathbf{Z}_s| \angle -\theta_s} - \frac{|\mathbf{V}_t| \angle 0}{|\mathbf{Z}_s| \angle -\theta_s} = \frac{|\mathbf{E}_f|}{|\mathbf{Z}_s|} \angle (-\delta + \theta_s) - \frac{|\mathbf{V}_t|}{|\mathbf{Z}_s|} \angle \theta_s$$

$$\hat{\mathbf{S}} = \mathbf{V}_t \mathbf{I}_a^* = |\mathbf{V}_t| \angle 0^\circ \left\{ \frac{|\mathbf{E}_f|}{|\mathbf{Z}_s|} \angle (-\delta + \theta_s) - \frac{|\mathbf{V}_t|}{|\mathbf{Z}_s|} \angle \theta_s \right\}$$

$$\hat{\mathbf{S}} = |\mathbf{V}_t| \frac{|\mathbf{E}_f|}{|\mathbf{Z}_s|} \angle (-\delta + \theta_s) - |\mathbf{V}_t| \frac{|\mathbf{V}_t|}{|\mathbf{Z}_s|} \angle \theta_s$$

A potência complexa S é potência em VA por fase.

MÁQUINA SÍNCRONA

CARACTERÍSTICA DE POTÊNCIA E TORQUE

Se a resistência do circuito de armadura for desprezada, então $Z_s = X_s$ e $\theta_s=0$.

$$P_{3\phi} = \frac{3|V_t||E_f|}{|X_s|} \text{sen}(\delta)$$

$$P_{3\phi} = P_{\text{max}} \text{sen}(\delta)$$

$$Q_{3\phi} = \frac{3|V_t||E_f|}{|X_s|} \cos(\delta) - \frac{3|V_t|^2}{|X_s|}$$

MÁQUINA SÍNCRONA

CARACTERÍSTICA DE POTÊNCIA E TORQUE

Ambos potência e torque variam com o ângulo δ que é denominado de ângulo de potência ou ângulo de torque.

Considerando desprezada as perdas no estator nesta análise, a potência desenvolvida nos terminais é também a potência no air gap. O torque desenvolvido da máquina é:

$$T = \frac{P_{3\phi}}{\omega_s} = \frac{3}{\omega_s} \frac{|V_t| |E_f|}{|X_s|} \text{sen}(\delta)$$

A máquina pode ser carregada gradualmente até o limite da potência máxima ou do torque máximo, conhecido como *limites de estabilidade estática*.

MÁQUINA SÍNCRONA

CARACTERÍSTICA DE POTÊNCIA E TORQUE

Ambos potência e torque variam com o ângulo δ que é denominado de ângulo de potência ou ângulo de torque.

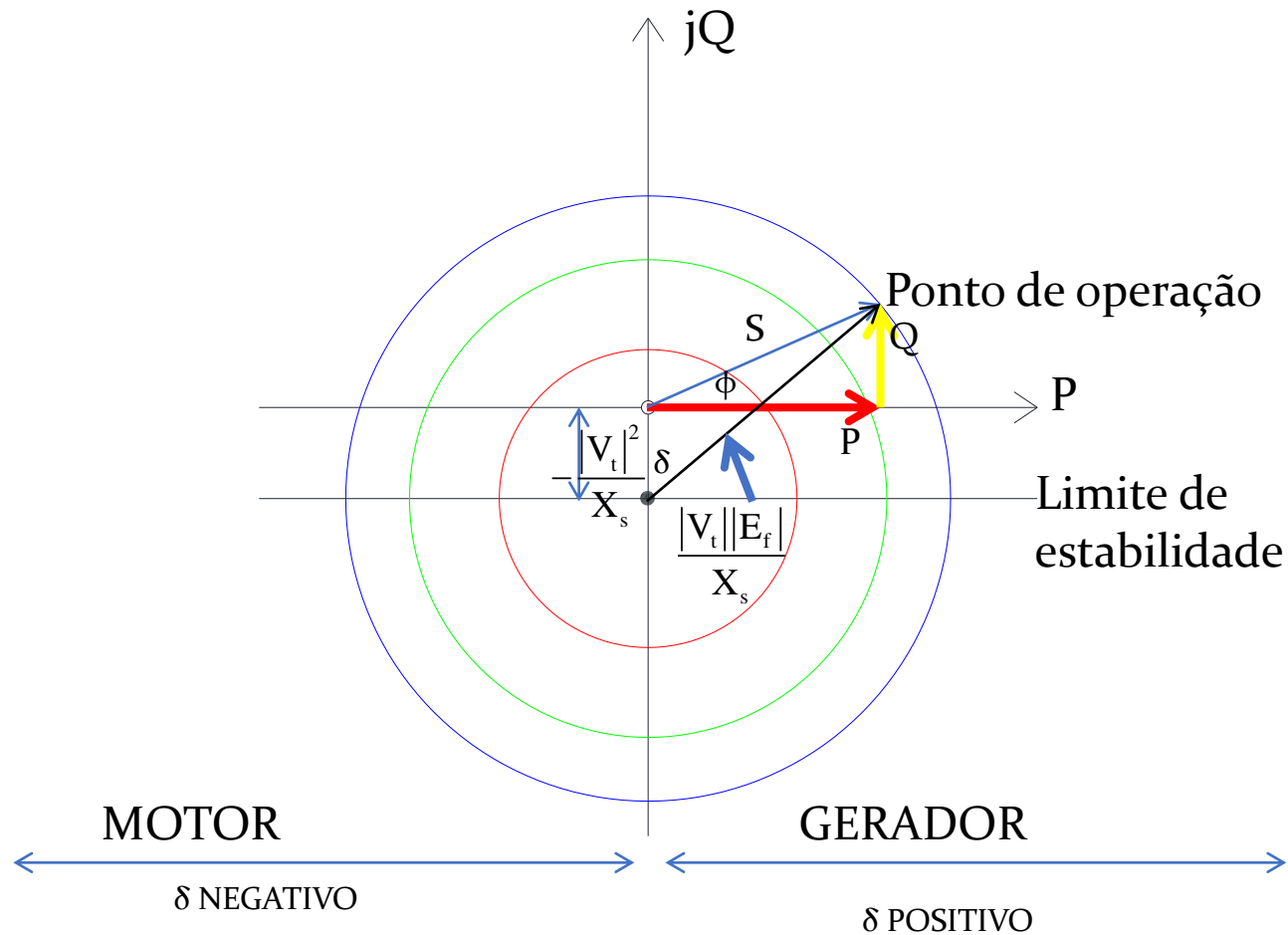
Considerando desprezada as perdas no estator nesta análise, a potência desenvolvida nos terminais é também a potência no air gap. O torque desenvolvido da máquina é:

$$T = \frac{P_{3\phi}}{\omega_s} = \frac{3}{\omega_s} \frac{|V_t| |E_f|}{|X_s|} \text{sen}(\delta)$$

A máquina pode ser carregada gradualmente até o limite da potência máxima ou do torque máximo, conhecido como *limites de estabilidade estática*.

MÁQUINA SÍNCRONA

LUGAR DA POTÊNCIA COMPLEXA



MÁQUINA SÍNCRONA

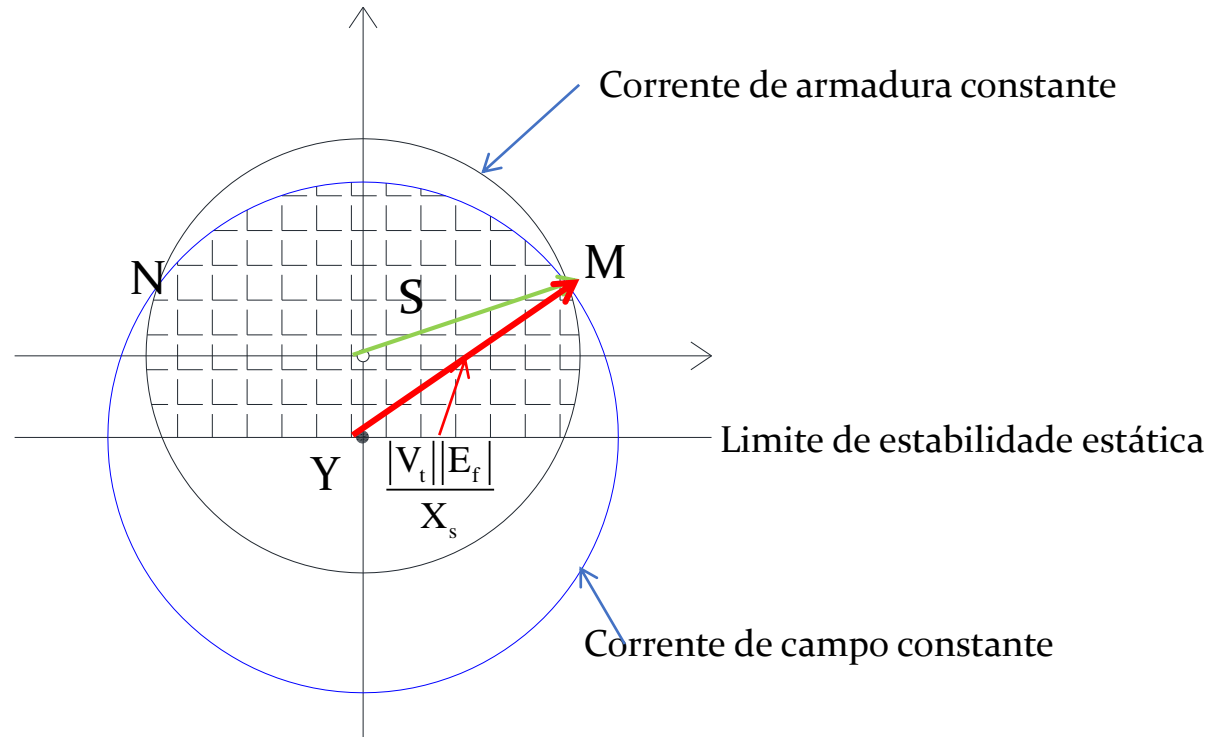
CURVAS DE CAPACIDADE

A máquina síncrona não pode operar em todos os pontos das regiões limitadas pelos círculos, sem ultrapassar os limites os seus limites nominais. A região de operação é limitada pelas seguintes considerações:

- ❖ Aquecimento do enrolamento de armadura determinado pela corrente de armadura
- ❖ Aquecimento do enrolamento de campo determinado pela corrente de campo
- ❖ Limite de estabilidade em regime permanente.

MÁQUINA SÍNCRONA

CURVAS DE CAPACIDADE



O círculo com raio com centro em O e raio $S (=V_t I_a)$ define a região de operação para o qual o aquecimento do enrolamento de armadura permanece no limite permitido.

MÁQUINA SÍNCRONA

CURVAS DE CAPACIDADE

O círculo com centro Y $(0, -\frac{|V_t|^2}{X_s})$ e raio $\frac{|V_t||E_f|}{X_s}$ definem a região de operação para a qual o aquecimento do enrolamento de campo não é excedido.

A reta horizontal corresponde ao limite estático.

A área hachurada define a região de operação da máquina síncrona. Os pontos de intersecção M (gerador) e N (motor) das curvas do limite de aquecimento do enrolamento de armadura e do limite de aquecimento do enrolamento de campo determinam os pontos de operação ótimo, pois esses pontos produzem a máxima utilização dos circuitos de armadura e de campo.

MÁQUINA SÍNCRONA

CONTROLE DO FATOR DE POTÊNCIA

Uma característica da máquina síncrona é que o fator de potência da máquina pode ser controlado através da corrente de campo. A corrente de campo pode ser ajustada para que a corrente circulante pela máquina esteja em atraso ou em avanço. Esta característica do fator de potência pode ser explicado a partir do diagrama fasorial.

Assuma operação com potência constante de um motor síncrono conectado a uma barra infinita.

Para uma máquina trifásica a transferência de potência é:

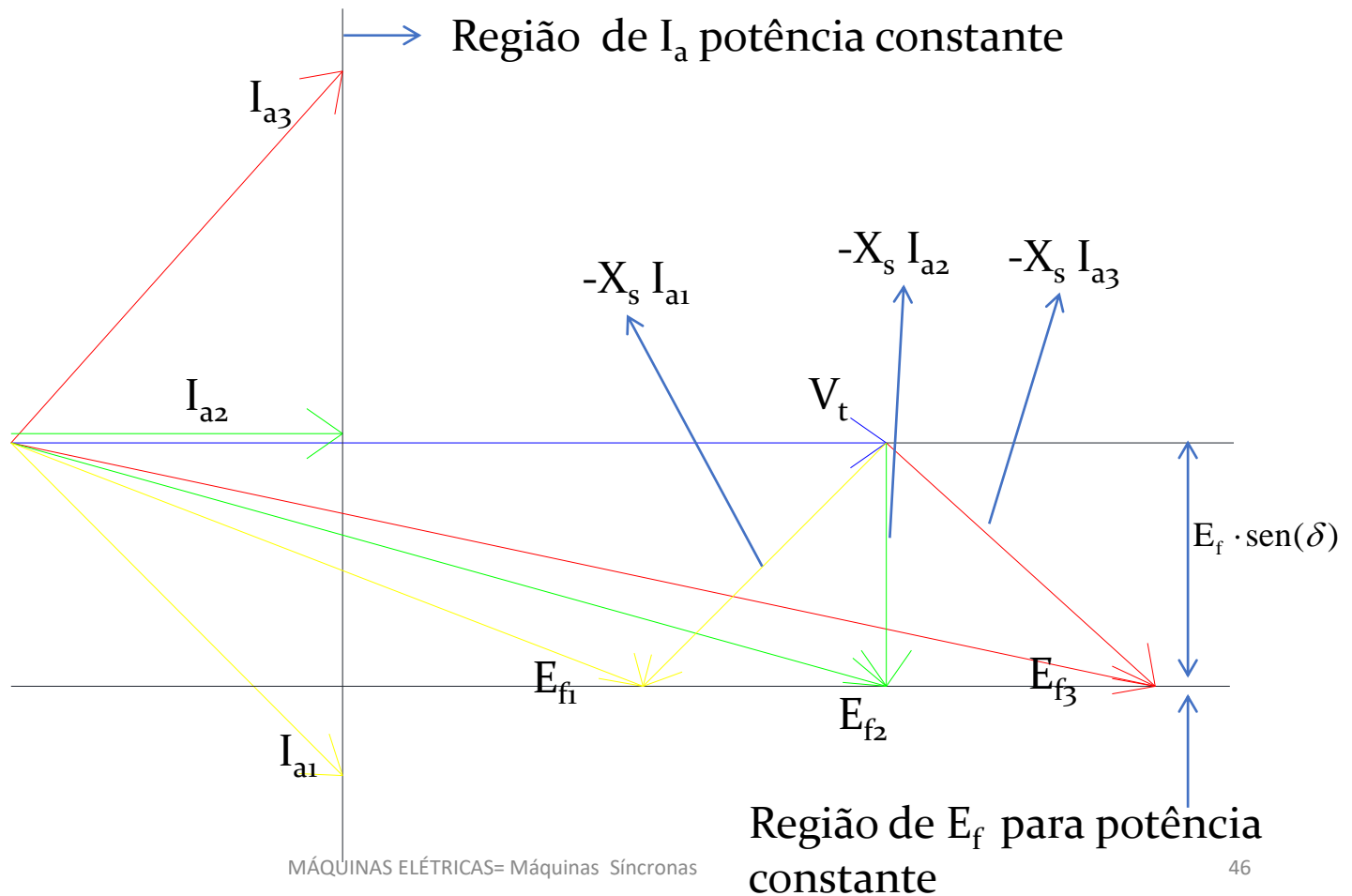
$$P = 3 \cdot V_t \cdot I_a \cos(\phi)$$

Como V_t é constante, a parcela $I_a \cos(\phi)$ é também constante.

MÁQUINA SÍNCRONA

CONTROLE DO FATOR DE POTÊNCIA

DIAGRAMA FASORIAL



MÁQUINA SÍNCRONA

O diagrama fasorial anterior possui três correntes do estator:

$I_a = I_{a1}$ (corrente em atraso em relação a V_t)

$I_a = I_{a2}$ (corrente em fase com V_t)

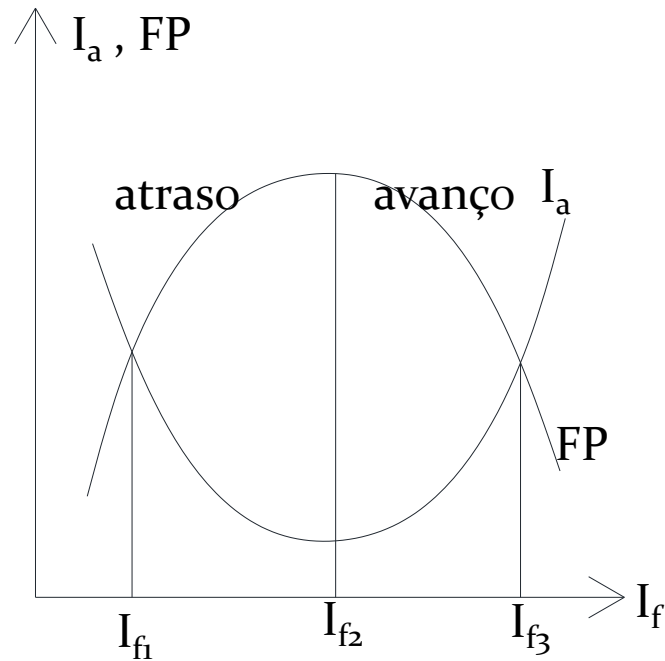
$I_a = I_{a3}$ (corrente em avanço em relação a V_t)

Para as correntes do estator as tensões de excitação E_{f1} , E_{f2} , E_{f3} (representando as correntes de campo I_{f1} , I_{f2} , I_{f3}) foram estabelecidas para satisfazer a relação:

$$E_f = V_t - jI_a X_a$$

MÁQUINA SÍNCRONA

Gráfico entre a corrente de armadura e a corrente de campo.



MÁQUINA SÍNCRONA

A potência também pode ser dada por:

$$P = 3 \frac{|V_t| |E_f|}{X_s} \text{sen}(\delta)$$

Para operação com potência constante $|E_f| \text{sen}(\delta)$ é constante. A tensão de excitação varia linearmente com a corrente de campo. Quando então I_f varia, E_f muda na região de potência constante e conseqüentemente I_a também mudará ao longo da região para a qual se tem potência constante. Isto implica mudança no ângulo do fator de potência ϕ .

Para corrente de excitação baixa I_{f1} , tem-se **sub excitação** ($E_f = E_{f1}$), a corrente do estator $I_a = I_{a1}$ é elevada e em atraso.

A corrente do estator é mínima ($I_a = I_{a2}$) e ocorre com fator de potência unitário para corrente de campo $I_f = I_{f2}$, onde $E_f = E_{f2}$.

MÁQUINA SÍNCRONA

Quando $E_f = E_{f2}$ é chamado de **excitação normal**.

Para corrente de campo elevada I_{f3} , tem-se a **sobre-excitação** ($E_f = E_{f3}$) e a corrente do estator $I_a = I_{a3}$ é grande e está em avanço.

Verifica-se com base nessa análise que para operação com potência constante, a corrente do estator varia com a corrente de campo.

Esta característica de controle do fator de potência pela corrente de campo pode ser utilizada para melhorar o fator de potência de uma instalação, principalmente em instalações onde existem motores de indução acionando carga.

MÁQUINA SÍNCRONA

Se a máquina síncrona opera sem transferir qualquer potência, mas simplesmente está “flutuando” na barra infinita, *o fator de potência é zero*. Isto é, a corrente do estator se adianta ou se atrasa em relação ao estator por 90° . A corrente do estator é sempre reativa.

Olhando a partir dos terminais da máquina, ela se comporta como um *indutor variável ou capacitor variável* à medida que a corrente de campo varia. Uma **máquina síncrona sem carga** é chamada de *compensador síncrono* e pode ser utilizada para regulação de tensão no terminais de uma linha de transmissão longa.

MÁQUINA SÍNCRONA

MÁQUINAS SÍNCRONAS DE PÓLOS SALIENTES

A relutância magnética é menor ao longo dos pólos e elevada entre os pólos.

A força magnetomotriz produzirá maior fluxo agindo ao longo do eixo polar, chamado de *eixo – d* e menor fluxo quando age ao longo do eixo interpolar, chamado de *eixo – q*.

Na máquina síncrona com rotor do tipo cilíndrico, a mesma força magnetomotriz de reação de armadura produz o mesmo fluxo independentemente da posição rotor porque o air gap é uniforme.

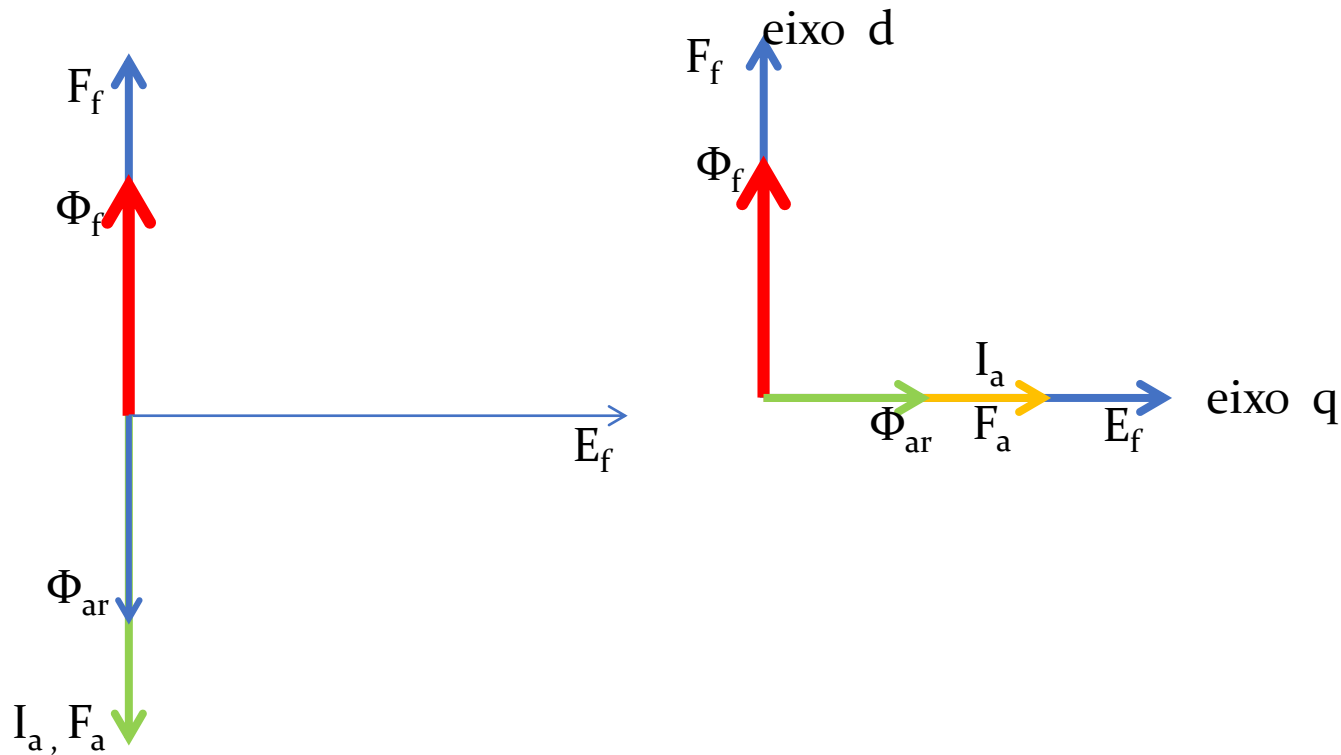
Conseqüentemente, a reatância de armadura que representa o fluxo de reação de armadura na máquina cilíndrica não poderá ser usada para representar

MÁQUINA SÍNCRONA

MÁQUINAS SÍNCRONAS DE PÓLOS SALIENTES

O fluxo de reação de armadura na máquina de pólo saliente.

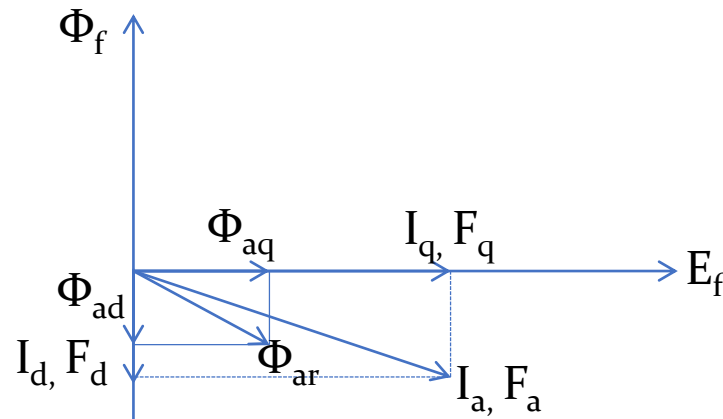
Considere as figuras abaixo:



MÁQUINA SÍNCRONA

MÁQUINAS SÍNCRONAS DE PÓLOS SALIENTES

Correntes e reatâncias d – q



A força magnetomotriz F_a (e dessa forma a corrente I_a) pode ser dividida em duas componentes: uma ao longo do eixo -d (F_d) e a outra ao longo do eixo-q (quadratura - F_q).

As componentes de força magnetomotriz produzem fluxos (Φ_{ad} , Φ_{aq}) nos respectivos eixos.

MÁQUINA SÍNCRONA

MÁQUINAS SÍNCRONAS DE PÓLOS SALIENTES

Os fluxos podem ser representados pelas seguintes reatâncias:

X_{ad} : reatância de armadura de eixo-d que leva em conta o fluxo Φ_{ad} produzido pela corrente de eixo-d I_d .

X_{aq} : reatância de armadura de eixo-q que leva em conta o fluxo Φ_{aq} produzido pela corrente de eixo-q I_q .

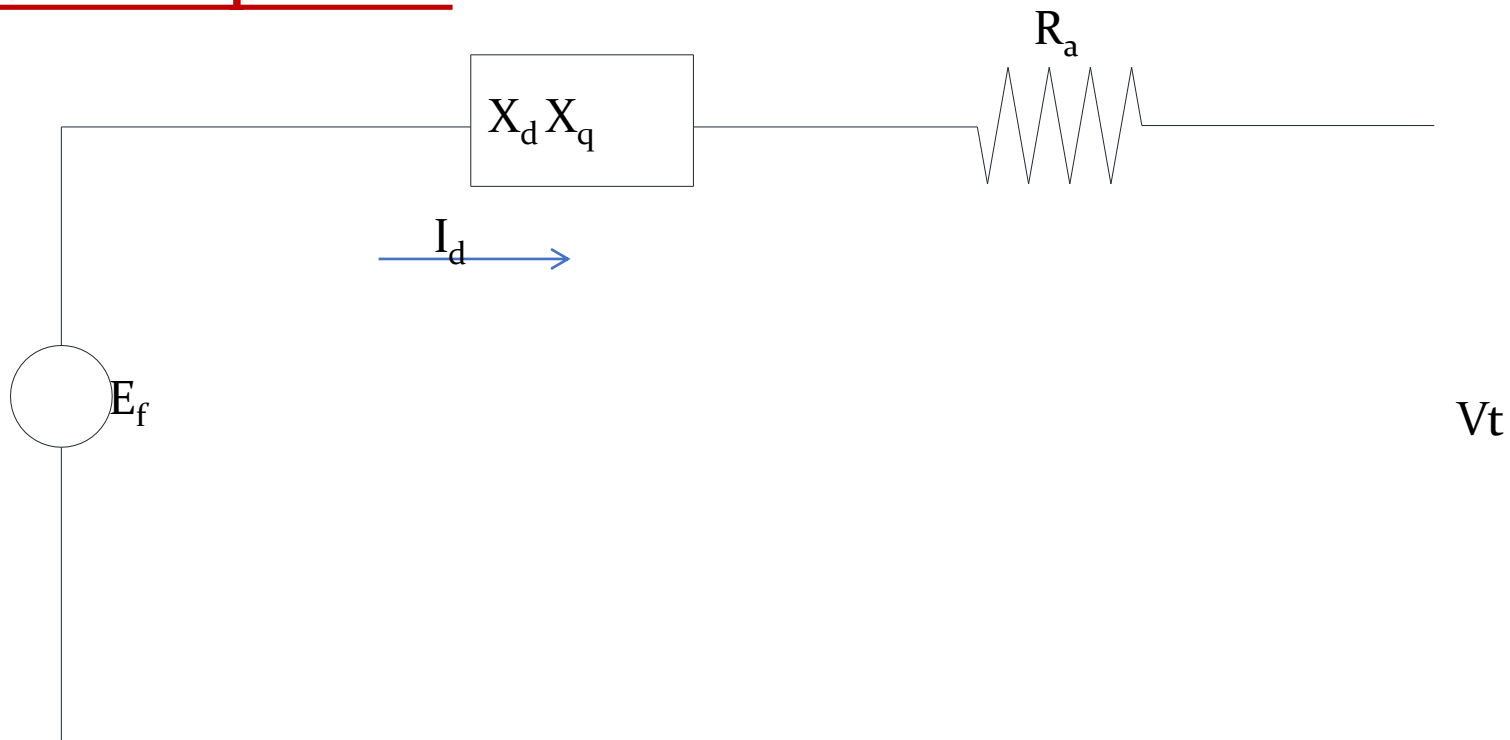
A reatância de dispersão é incluída para levar em conta o fluxo de dispersão produzido pelo enrolamento de armadura.

MÁQUINA SÍNCRONA

MÁQUINAS SÍNCRONAS DE PÓLOS SALIENTES

X_d é maior do X_q porque a relutância magnética do eixo-d é menor que a relutância do eixo-q.

Circuito equivalente



MÁQUINA SÍNCRONA

MÁQUINAS SÍNCRONAS DE PÓLOS SALIENTES

No circuito equivalente para máquinas síncronas de pólos salientes, as reatâncias síncronas de eixo $-d$ e eixo $-q$ devem ser consideradas. As componentes de corrente I_d e I_q produzem queda de tensão $jX_d I_d$ e $jX_q I_q$.

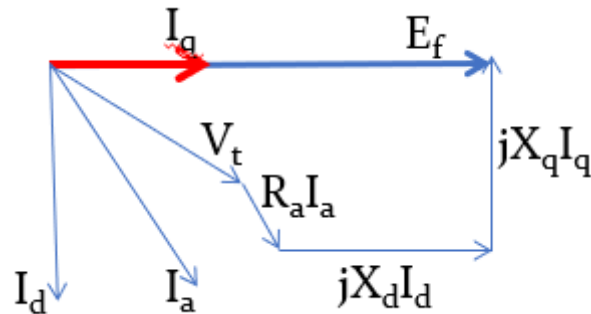
A relação fasorial é:

$$E_f = V_t + I_a R_a + I_d jX_d + I_q jX_q$$

MÁQUINA SÍNCRONA

MÁQUINAS SÍNCRONAS DE PÓLOS SALIENTES

Na operação geradora:



δ – ângulo entre o fasor V_t e E_f

Ψ – ângulo entre o fasor I_a e E_f

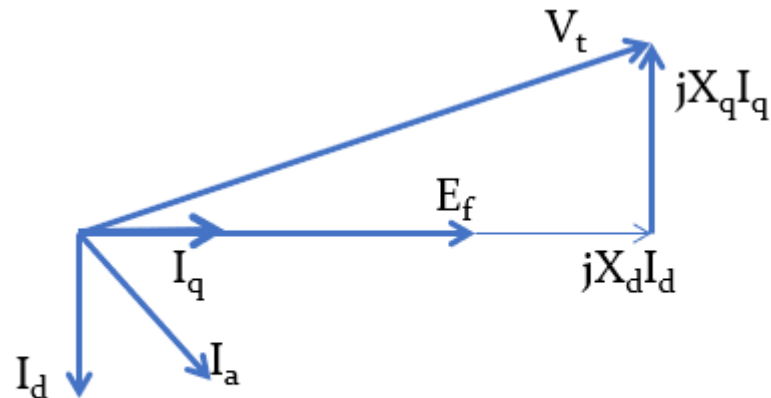
Φ – ângulo entre I_a e a tensão terminal V_t

MÁQUINA SÍNCRONA

MÁQUINAS SÍNCRONAS DE PÓLOS SALIENTES

Operação motora

Desprezando a resistência de armadura



MÁQUINA SÍNCRONA

MÁQUINAS SÍNCRONAS DE PÓLOS SALIENTES

Para operação motora desprezando a resistência do circuito de armadura

$$V_t = E_f + I_d jX_d + I_q jX_q$$

A partir dos diagramas fasoriais mostrados para gerador e para motor:

$$\psi = \phi \pm \delta$$

$$|I_d| = |I_a| \text{sen}(\psi) = |I_a| \text{sen}(\phi \pm \delta)$$

$$|I_q| = |I_a| \text{cos}(\psi) = |I_a| \text{cos}(\phi \pm \delta)$$

$$|V_t| \text{sen}(\delta) = |I_q| X_q = |I_a| X_q \text{cos}(\phi \pm \delta)$$

$$\text{tg}(\delta) = \frac{|I_a| X_q \text{cos}(\phi)}{|V_t| \pm |I_a| X_q \text{sen}(\phi)}$$

MÁQUINA SÍNCRONA

MÁQUINAS SÍNCRONAS DE PÓLOS SALIENTES

POTÊNCIA TRANSFERIDA

Para dedução da fórmula da potência e do torque desenvolvido pela máquina síncrona de polos salientes, a resistência e as perdas no núcleo serão desprezadas.

$$S = V_t \cdot I_a^*$$

$$S = |V_t| \angle(-\delta) \cdot \left(|I_q| - j |I_d| \right)^*$$

$$S = |V_t| \angle(-\delta) \cdot \left(|I_q| + j |I_d| \right)$$

$$|I_d| = \frac{|E_f| - |V_t| \cos(\delta)}{X_d}$$

$$|I_q| = \frac{|V_t| \operatorname{sen}(\delta)}{X_q}$$

CURVA DE SATURAÇÃO

