AULA 3

1. **MÁQUINAS SÍNCRONAS**

3.1) Características da Máquina Síncronas:

Denomina-se máquina síncrona, porque quando ligado à rede elétrica, a velocidade do eixo fica sincronizada com a frequencia da rede.

|  |  |
| --- | --- |
| ; | = freqüência angular da rede (rad/s) das tensões, correntes, força magnetomotriz etc. (variáveis elétricas)  *fe* = freqüência da rede (Brasil 60Hz), portanto |
|  | = Velocidade síncrona em rad/seg no eixo do gerador (variáveis mecânicas).  p = número de pólos |
|  | = velocidade síncrona em RPM no eixo do gerador (variáveis mecânicas) |

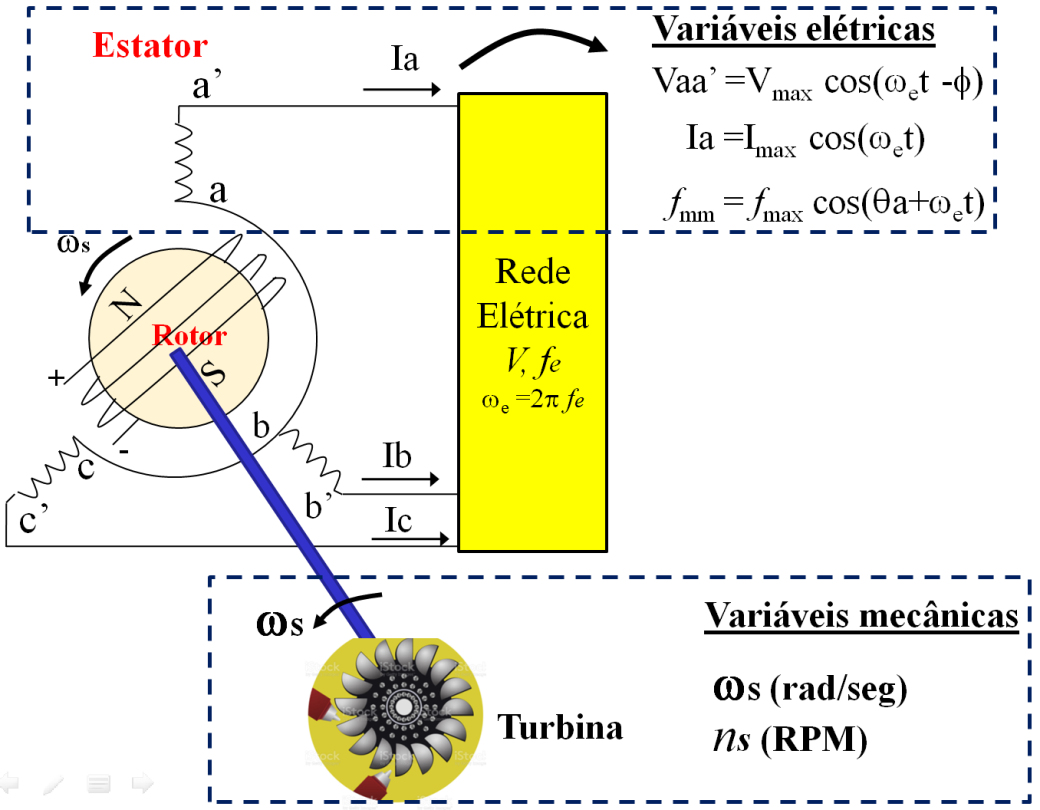


Figura 3.1: Varáveis elétricas e mecânicas em máquinas síncronas

Exemplo: Para os geradores síncronos da empresa Itaipu Binacional determine a velocidade síncrona em RPM e rad/seg.

|  |  |
| --- | --- |
| Lado do Paraguay | Lado do Brasil |
| V =18kV | V=18kV |
| f = 50Hz | f=60Hz |
| p=66 | p=78 |
| **ωe =314,15 rad/seg** | **ωe =377rad/seg** |
| **ns =90,90 RPM** | **ns =92,6RPM** |
| **ωs =9,51 rad/seg** | **ωs =9,66rad/seg** |

Nas próximas seções o subíndice “e” nas variáveis elétricas serão sobre entendidas para facilitar a notação. Ou seja, **ωe = ω (freqüência elétrica da rede).**

Aspectos construtivos

Estator (fixa) = Armadura (Potência)

Partes Rotor (móvel) = Enrolamento de campo

Rotor liso (turbogeradores)

Tipos alta velocidade

Rotor de pólos salientes (hidrogeradores)

baixa velocidade

|  |  |
| --- | --- |
|  |  |
| Rotor de polos lisos ou rotor cilíndrico | Rotor de polos salientes |

Figura 3.2: Rotor de pólos lisos e salientes de máquinas síncronas

**3.2) Alimentação do Circuito de Campo da Máquina Síncrona**

a) Alimentação externa a partir de anéis deslizantes (ou anéis coletores) e escovas (carvões).

b) Alimentação de uma fonte própria (sem anéis deslizantes e escovas)

|  |  |
| --- | --- |
| **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

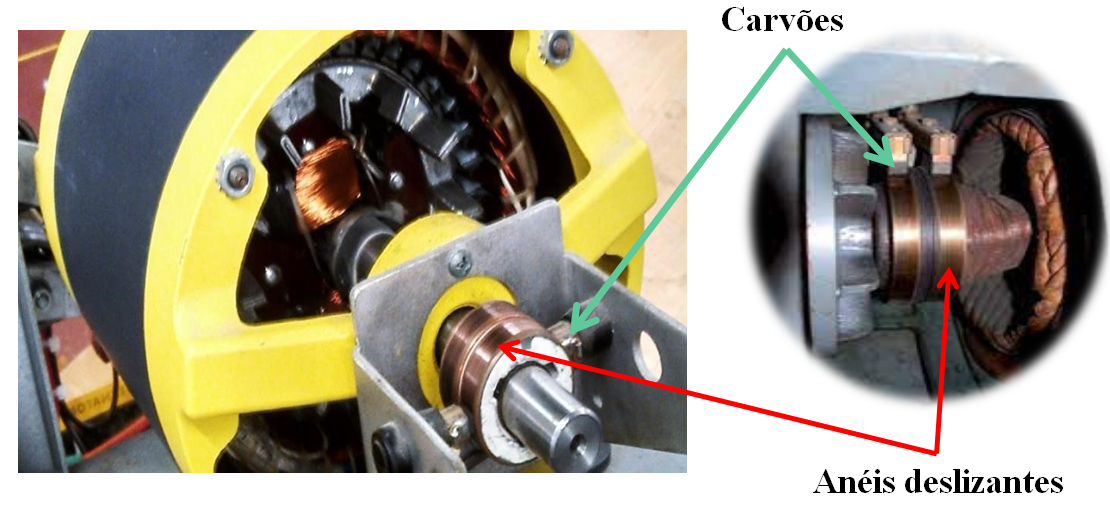


Figura 3.3: Rotor de máquinas síncronas alimentados com anéis deslizantes (coletores).

Tipo II – Com alimentação externa e sem anéis deslizantes usando uma excitatriz.

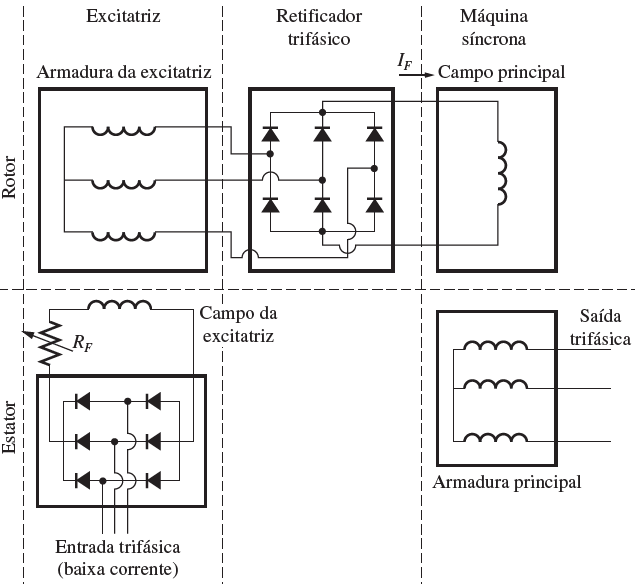


Figura 3.4: Rotor de máquinas síncronas sem anéis deslizantes (coletores) com excitatriz.

Tipo III – Sem alimentação externa com excitatriz e excitatriz piloto (gerador de imã permanente)

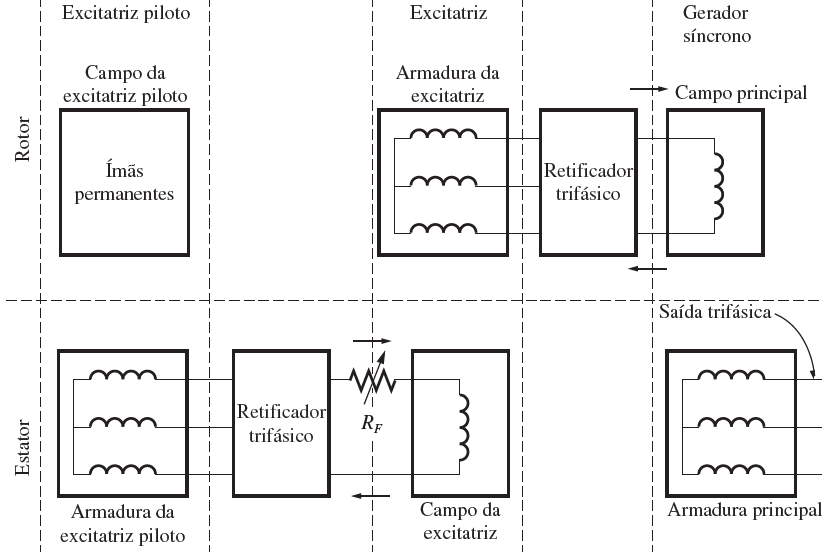


Figura 3.5: Rotor de máquinas síncronas sem anéis deslizantes (coletores) com excitatriz e excitatriz piloto.

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

**3.3) Tensão gerada em vazio em geradores síncronos (EA)**

Quando o campo magnético girante produzido pelo circuito do rotor concatenar as bobinas do circuito do estator aparecerá tensões induzidas como mostra a figura:

|  |  |
| --- | --- |
|  |  |
| Figura 3.6: Tensão gerada em uma espira | |

A tensão induzida ou **tensão gerada em vazio** segue a equação:

**eind = (V x B) l**

Sendo:

v= velocidade da espira em relação ao campo magnético B

B= densidade do campo magnético produzido pelo rotor (girante)

l=comprimento do condutor dentro do campo magnético

Para três enrolamentos defasados 120° elétricos, as tensões induzidas (ou tensões geradas em vazio) nos enrolamentos do estator serão:

Sendo:

Nc = Nro de espiras por enrolamento.

*φ* = Fluxo do circuito de campo proporcional a densidade de campo B e área A da espira.

ωe = freqüência angular elétrica em rad/s das tensões induzidas.

O valor máximo da tensão induzida é:

O valor RMS da tensão induzida no estator é:

Exemplo: Para um gerador de 2polos a densidade de fluxo do rotor pico é 0,2T e a velocidade síncrona 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:

1. Tensão por fase do gerador, em função do tempo.
2. Tensão por fase
3. Tensão de linha

|  |  |
| --- | --- |
| NC=15  B = 0,2 T  p=2  *ns*= 3600 rpm  ωs= 377 rad/s |  |

A freqüência elétrica ω das tensões e correntes induzidas em rad/s é:

ωe = p.ωs/2 = ωs

ωe = 377 rad/s

ϕ = B . A = 0,2 . (0,5 . 0,3) = 0,03 Wb

**3.4)Circuito Equivalente em regime permanente**

Para encontrar o circuito equivalente deve-se considerar como muda tensão nos terminais da máquina após fechar a chave S1 da Fig. 3.7.

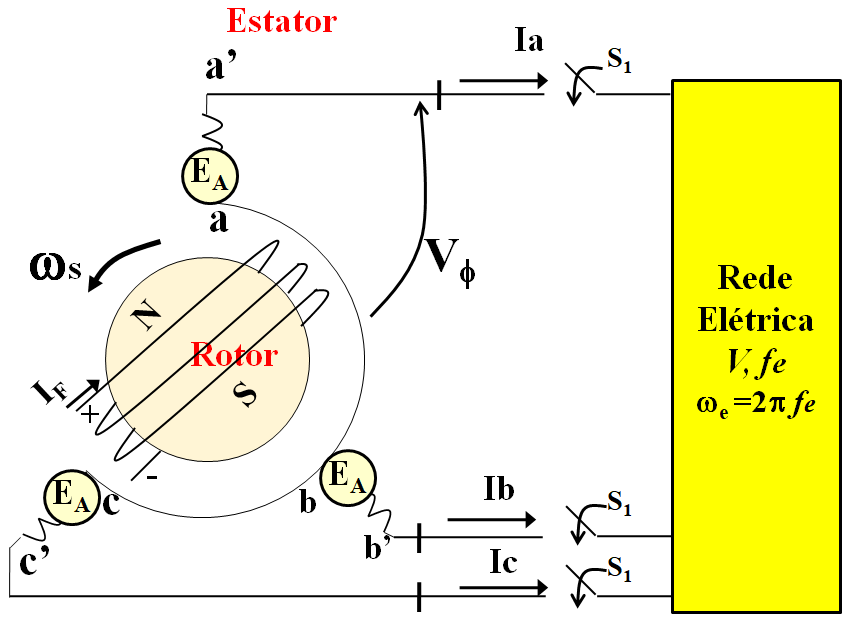


Figura 3.7: Máquina síncrona ao ligar à rede trifásica

Quando a máquina está em vazio (IA=0) a tensão nos terminais (Vφ) é igual a tensão gerada (EA). Entretanto ao fechar a chave S1, quatro efeitos devem ser considerados:

a) Efeito do fluxo produzido pelo enrolamento do estator (armadura) que produz um fluxo que distorce o fluxo principal. Este efeito é chamado de “reação de armadura” e é proporcional a corrente de armadura. A reação de armadura é modelado por uma reatância chamada reatância de reação de armadura “**Xarm”.**

b) Efeito da autoindutância do enrolamento do estator proporcional ao **fluxo de dispersão do enrolamento do estator (armadura)**. O fluxo de dispersão é modelado por uma reatância de dispersão **X*l*** .

c) Efeito da resistência dos enrolamentos do estator (armadura). É modelado por uma resistência **RA.**

d) Efeito da saliência dos pólos (apenas para máquinas de pólos salientes). É modelado por duas reatâncias **“Xarmd” e “Xarmq”.**

Na sequencia será desenvolvido o circuito equivalente para máquinas de pólos lisos portanto apenas os efeito “a”-“c” serão considerados. Quando seja tratado máquinas de pólos salientes, o quarto efeito será considerado para o circuito equivalente.

Voltando a figura 3.7, ao fluir correntes 3 no estator é produzido um fluxo na armadura(reação de armadura) que distorce o fluxo principal ( 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:

|  |  |
| --- | --- |
|  |  |

Figura 3.8: Diagrama de fluxo e tensões devido a reação de armadura

*φF* : Fluxo devido ao circuito de campo (principal)

*φarm* : Fluxo devido à reação de armadura

*φr* : Fluxo resultante

IA : Corrente de armadura

EA : Tensão proporcional ao fluxo principal *φF*

EA : Tensão proporcional ao fluxo de reação de armadura *φarm*

Er : Tensão proporcional ao fluxo resultante *φr*

A tensão de reação de armadura pode ser modelada como sendo o produto de uma reatância (reatância de reação de armadura) vezes a corrente de armadura com sinal negativo, ou seja:

IA

Sendo:

= Reatância proporcional à reação de armadura

Assim a tensão resultante ficará:

Er = EA + E*arm*

O circuito equivalente incluindo a reação de armadura é mostrada abaixo

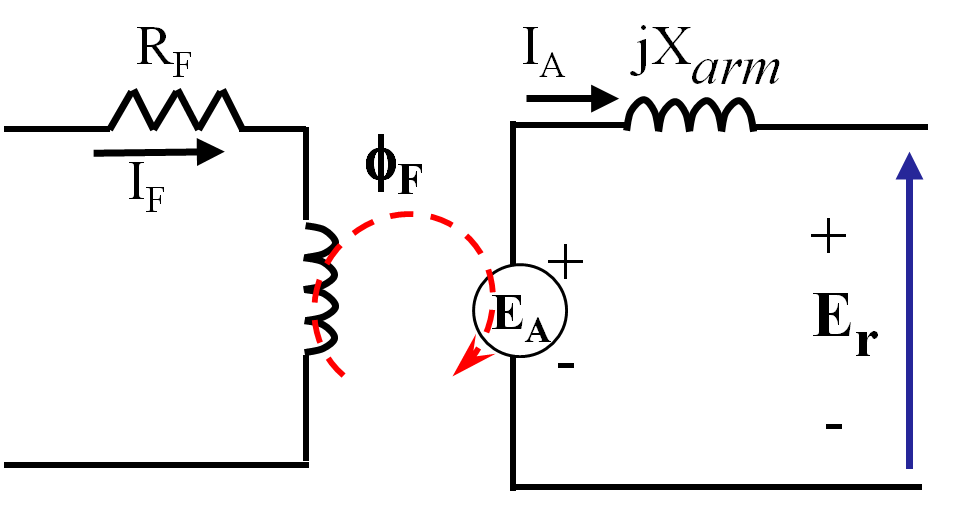


Figura 3.9: Efeito da reação de armadura

Para considerar os efeitos da dispersão do fluxo utiliza-se uma reatância de dispersão *Xl*, portanto haverá uma queda devido a reatância de dispersão

Representa os efeitos do fluxo de dispersão

Sendo:

= Reatância de dispersão

Considerando a resistência da armadura (estator):

Sendo:

= Resistência de armadura

Pode-se somar a reatância proporcional à reação de armadura e reatância de dispersão em uma única reatância chamada reatância síncrona como:

Sendo:

Xs : Reatância síncrona que é igual a *Xarm* + *Xl*

O circuito equivalente por fase considerando todos esses efeitos é:

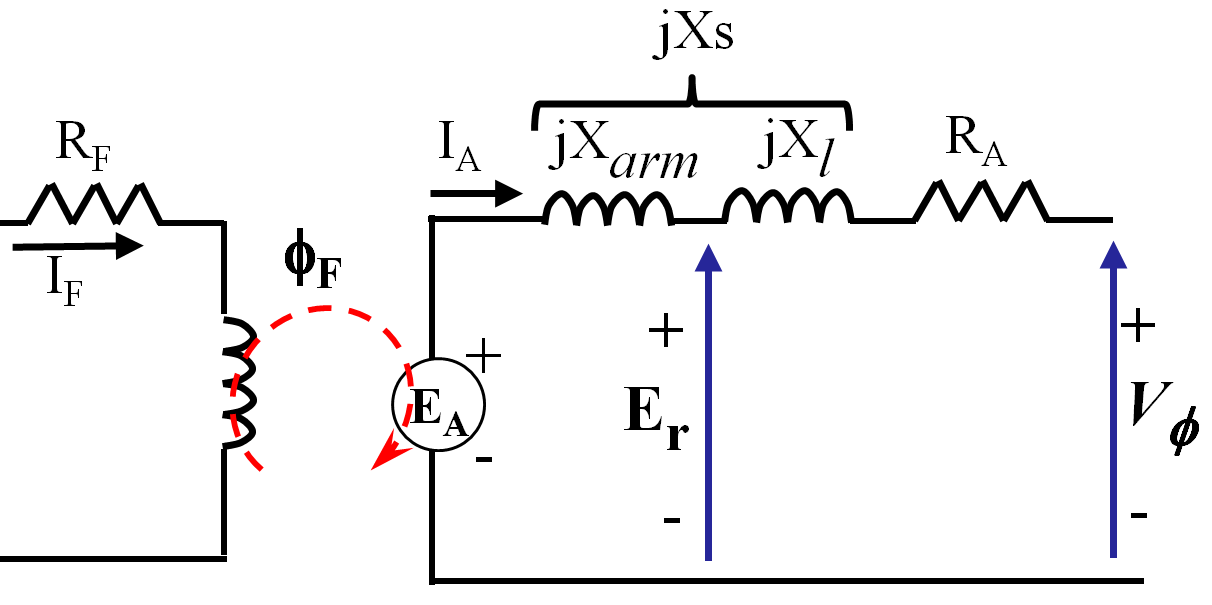


Figura 3.10: Circuito equivalente monofásico

Considerando as três fases:

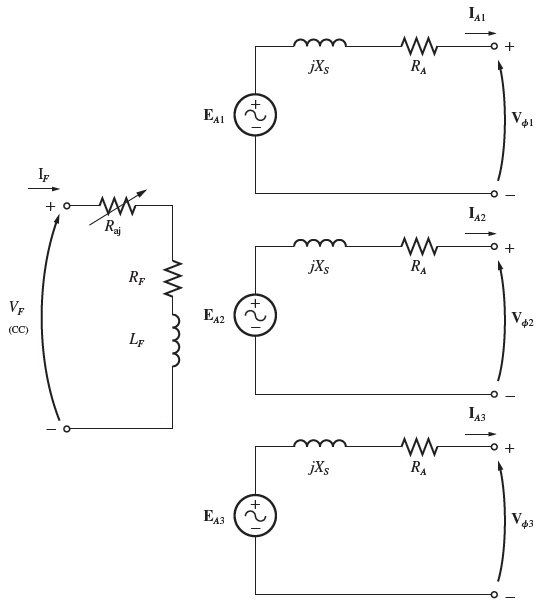


Figura 3.11: Circuito equivalente do gerador síncrono nos três enrolamentos

Os terminais das bobinas podem ser ligados em Y ou Δ

|  |  |
| --- | --- |
|  |  |

Figura 3.12: Circuito equivalente trifásica do gerador síncrono ligado em estrela e em delta.

Y →

Δ →