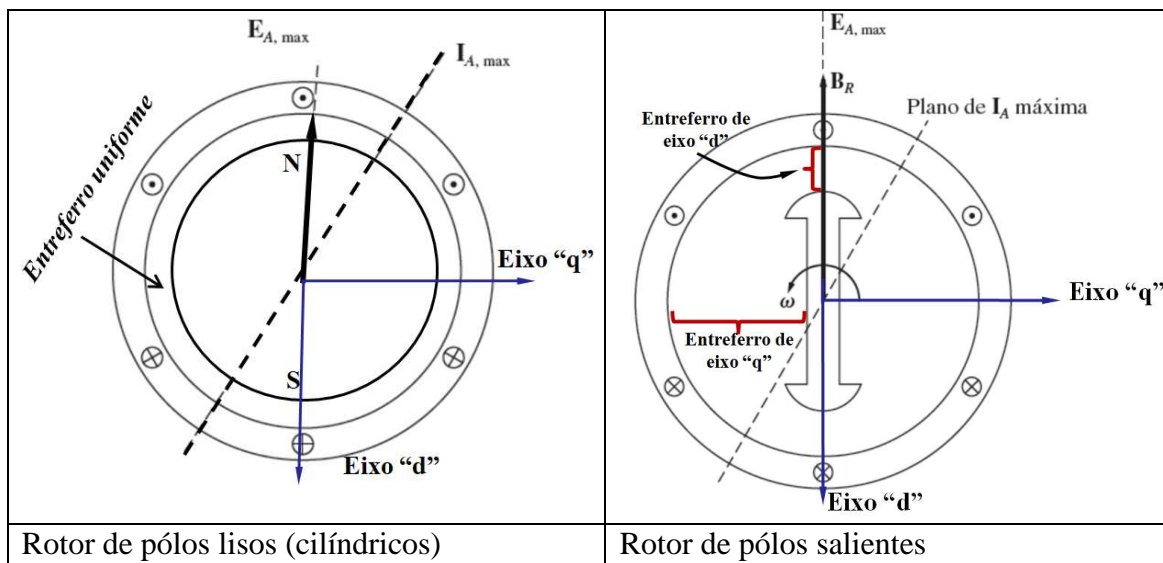


Aula Nro: 14

14.1) Máquinas de Pólos Salientes

Em máquinas síncronas de pólos lisos (ou rotor cilíndrico), foi considerada que a reatância síncrona ao longo do entreferro era constante em qualquer direção. Essa suposição era válida porque o entreferro em máquinas de pólos lisos era praticamente uniforme.

No caso de máquinas de pólos salientes, esta aproximação não é possível porque o entreferro no eixo direto (direção do fluxo do circuito de campo principal) é inferior ao entreferro no eixo em quadratura (eixo 90° atrasado ao eixo d^1) como mostra a figura.



¹ Para fins de estudo foi adotada como referência de ângulo que o eixo direto "d" está atrasado 90° em relação ao eixo em quadratura "q". Entretanto muitos autores utilizam outra referência que pode trazer confusão. Sugere-se sempre verificar a referência de ângulo primeiro antes utilizar as equações de algum livro.

Quais são os fatores que influenciam para que a tensão nos terminais V_ϕ seja diferente quando está em vazio (tensão gerada, E_A) do que quando está em carga?

pólos lisos

- 1) Fluxo de reação de armadura
- 2) Resistência de armadura
- 3) Fluxo de dispersão da armadura (indutância de dispersão)

pólos salientes

- 1) Fluxo de corrente de armadura
- 2) Resistência de armadura
- 3) Fluxo de dispersão da armadura (indutância de dispersão)
- 4) Efeito do formato dos pólos

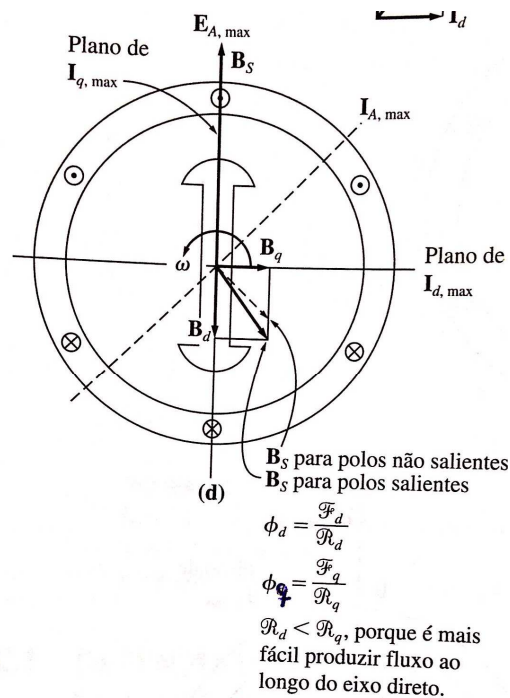


Fig 14.1 Diagrama de Fluxos e campos na máquina de pólos salientes

Fazendo uma análise parecida à máquinas de pólos lisos tem-se (vide aula 3):

Pólos Lisos:

$$V_\phi = E_A - j(X_{arm} + x_l)I_A - R_A I_A \quad (1)$$

$$V_\phi = E_A - jX_s I_A - R_A I_A \quad (2)$$

No caso de pólos salientes, considerando os efeitos no eixo d e q, tem-se:

$$V_\phi = E_A - j(X_{armd} + x_l)I_d - j(X_{armq} + x_l)I_q - R_A I_A \quad (3)$$

$$V_\phi = E_A - jX_d I_d - jX_q I_q - R_A I_A \quad (4)$$

Sendo

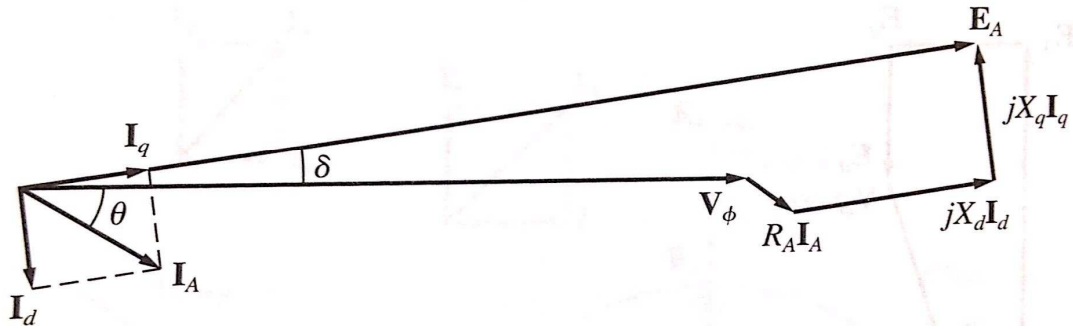
x_l : Reatância de dispersão devido a fluxo de dispersão do enrolamento do estator (proporcional à autoindutância do estator).

$X_d = X_{armd} + x_l$: Reatância síncrona de eixo direto.

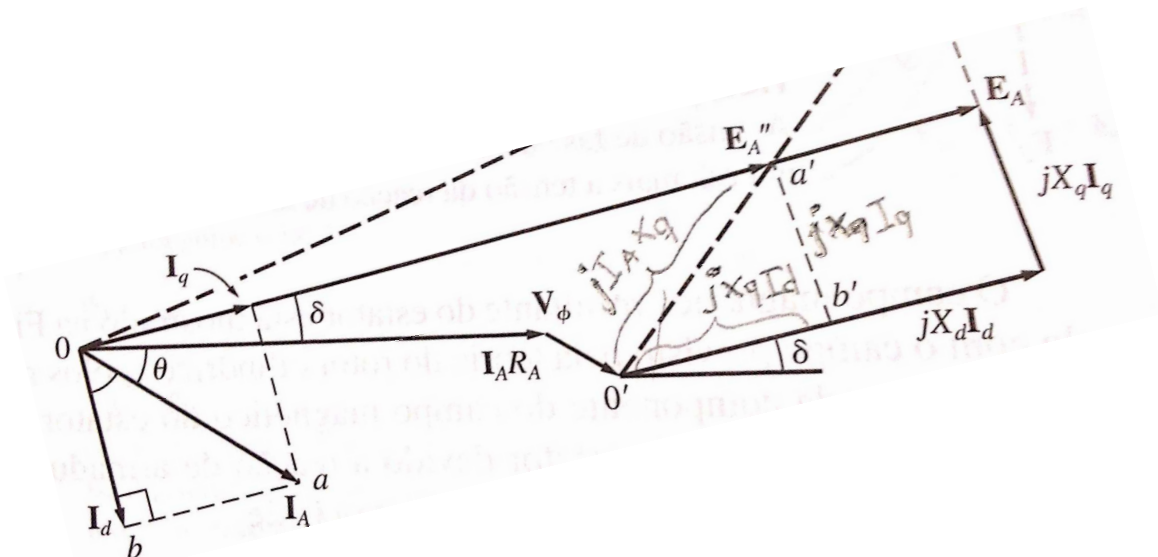
$X_q = X_{armq} + x_l$: Reatância síncrona de eixo em quadratura.

14.2) Diagrama fasorial

O diagrama fasorial da equação (4) fica:



Observe que para os cálculos da equação (4) é necessário conhecer as correntes no eixo direto e quadratura, I_d e I_q , respectivamente. Para esse objetivo é necessário conhecer o ângulo de potência “ δ ” que não é disponível nos dados. Um artifício é calcular a tensão E''_A que não tem relação nenhuma com E_A (tensão interna) e é apenas para determinar a posição do eixo q, ou o ângulo δ usando a figura abaixo.



$$E''_A = V_T + R_A I_A + jX_q I_A \quad (5)$$

A tensão E''_A , encontra-se na mesma direção que o eixo q, portanto o ângulo dela será δ .

A partir do conhecimento de δ , pode determinar-se:

$$|I_d| = |I_A| \sin(\delta - \theta)$$

$$|I_q| = |I_A| \cos(\delta - \theta)$$

Os fasores de I_d e I_q são

$$I_q = |I_q| \angle \delta$$

$$I_d = |I_d| \angle -(90 - \delta)$$

14.3) Equações de Torque e Potência

A potência de saída de um gerador síncrono de rotor cilíndrico, como função do ângulo de conjugado, foi dada no Capítulo 5 como

$$P = \frac{3V_\phi E_A \sin \delta}{X_S} \quad (4-20)$$

Nessa equação, assumiu-se que a resistência de armadura era desprezível. Fazendo a mesma suposição, qual é a potência de saída de um gerador de polos salientes em função do ângulo de conjugado? Para descobrir, vamos nos referir à Figura C-6. A potência de saída de um gerador síncrono é a soma da potência devido à corrente de eixo direto mais a potência devido à corrente de eixo em quadratura:

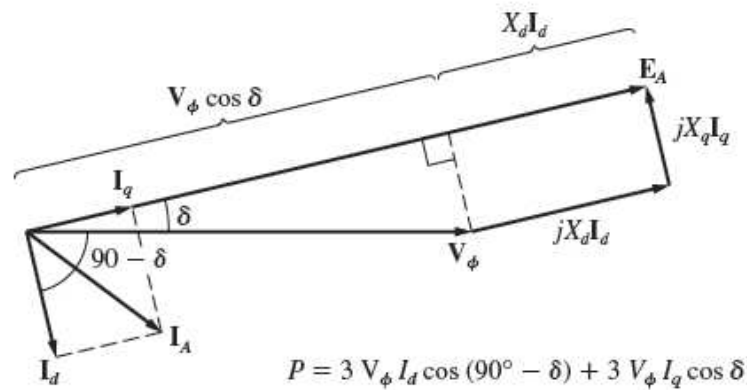


FIGURA C-6

Determinação da potência de saída de um gerador síncrono de polos salientes. As correntes I_d e I_q contribuem à potência de saída, como está mostrado.

$$\begin{aligned}
 P &= P_d + P_q & (C-9) \\
 &= 3V_\phi I_d \cos(90^\circ - \delta) + 3V_\phi I_q \cos \delta \\
 &= 3V_\phi I_d \sin \delta + 3V_\phi I_q \cos \delta
 \end{aligned}$$

Da Figura C-6, temos que a corrente de eixo direto é dada por

$$I_d = \frac{E_A - V_\phi \cos \delta}{X_d} \quad (C-10)$$

e a corrente de eixo em quadratura

$$I_q = \frac{V_\phi \sin \delta}{X_q} \quad (C-11)$$

Substituindo as Equações (C-10) e (C-11) na Equação (C-9), obtemos

$$\begin{aligned}
 P &= 3V_\phi \left(\frac{E_A - V_\phi \cos \delta}{X_d} \right) \sin \delta + 3V_\phi \left(\frac{V_\phi \sin \delta}{X_q} \right) \cos \delta \\
 &= \frac{3V_\phi E_A}{X_d} \sin \delta + 3V_\phi^2 \left(\frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d} \right) \sin \delta \cos \delta
 \end{aligned}$$

Como $\delta \cos \delta = \frac{1}{2} \sin 2\delta$, essa expressão reduz-se a

$$P = \frac{3V_\phi E_A}{X_d} \sin \delta + \frac{3V_\phi^2}{2} \left(\frac{X_d - X_q}{X_d X_q} \right) \sin 2\delta \quad (C-12)$$

O primeiro termo dessa expressão é o mesmo que a potência em uma máquina de rotor cilíndrico e o segundo termo é a potência adicional, originária do conjugado de relutância da máquina.

Como o conjugado induzido no gerador é dado por $\tau_{\text{ind}} = P_{\text{conv}}/\omega_m$, o conjugado induzido na máquina pode ser expresso como

$$\tau_{\text{ind}} = \frac{3V_\phi E_A}{\omega_m X_d} \sin \delta + \frac{3V_\phi^2}{2\omega_m} \left(\frac{X_d - X_q}{X_d X_q} \right) \sin 2\delta \quad (C-13)$$

O conjugado induzido de um gerador de polos salientes em função do ângulo de conjugado δ está plotado na Figura C-7.

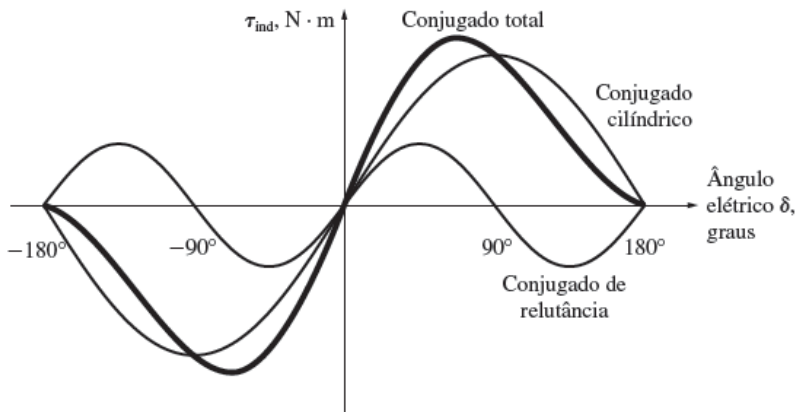


FIGURA C-7

Gráfico de conjugado *versus* ângulo de conjugado para um gerador síncrono de polos salientes. Observe a componente de conjugado devido à relutância do rotor.

Exemplo:

EXEMPLO C-1 Um gerador síncrono de 480 V, 60 Hz, conectado em Δ e quatro polos, tem uma reatância de eixo direto de $0,1 \Omega$ e uma reatância de eixo em quadratura de $0,075 \Omega$. Sua resistência de armadura pode ser ignorada. A plena carga, o gerador fornece 1200 A com um fator de potência de 0,8 atrasado.

- (a) Encontre a tensão gerada interna E_A desse gerador a plena carga, assumindo que ele tem um rotor cilíndrico de reatância X_d .
- (b) Encontre a tensão gerada interna E_A do gerador a plena carga, assumindo que ele tem um rotor de polos salientes.

Solução

- (a) Como esse gerador está ligado em Δ , a corrente de armadura a plena carga é

$$I_A = \frac{1200 \text{ A}}{\sqrt{3}} = 693 \text{ A}$$

O fator de potência da corrente é 0,8 atrasado, de modo que o ângulo de impedância θ da carga é

$$\theta = \arccos 0,8 = 36,87^\circ$$

Portanto, a tensão gerada interna é

$$\begin{aligned} E_A &= V_\phi + jX_s I_A \\ &= 480 \angle 0^\circ \text{ V} + j(0,1 \Omega)(693 \angle -36,87^\circ \text{ A}) \\ &= 480 \angle 0^\circ + 69,3 \angle 53,13^\circ = 524,5 \angle 6,1^\circ \text{ V} \end{aligned}$$

Observe que o ângulo de conjugado δ é $6,1^\circ$.

- (b) Assuma que o rotor é de polos salientes. Para decompor a corrente em componentes de eixo direto e de eixo em quadratura, é necessário que conheçamos a *direção* de E_A . Essa direção pode ser determinada a partir da Equação (C-8):

$$\begin{aligned} E_A'' &= V_\phi + R_A I_A + jX_q I_A && \text{(C-8)} \\ &= 480 \angle 0^\circ \text{ V} + 0 \text{ V} + j(0,075 \Omega)(693 \angle -36,87^\circ \text{ A}) \\ &= 480 \angle 0^\circ + 52 \angle 53,13^\circ = 513 \angle 4,65^\circ \text{ V} \end{aligned}$$

A direção de E_A é $\delta = 4,65^\circ$. A componente de eixo direto da corrente é, portanto,

Como os ângulos são:

$$\theta = -36,87^\circ$$

$$\delta = 4,65^\circ$$

$$|I_d| = |I_A| \sin(\delta - \theta) = 693 \sin(4,65 - (-36,87))$$

$$|I_q| = |I_A| \cos(\delta - \theta) = 693 \cos(4,65 - (-36,87))$$

Combinando esses valores e os ângulos, temos

$$I_d = 459 \angle -85,35^\circ \text{ A}$$

$$I_q = 519 \angle 4,65^\circ \text{ A}$$

A tensão gerada interna resultante é

$$\begin{aligned} E_A &= V_\phi + R_A I_A + jX_d I_d + jX_q I_q \\ &= 480 \angle 0^\circ \text{ V} + 0 \text{ V} + j(0,1 \Omega)(459 \angle -85,35^\circ \text{ A}) + j(0,075 \Omega)(519 \angle 4,65^\circ \text{ A}) \\ &= 524,3 \angle 4,65^\circ \text{ V} \end{aligned}$$

Observe que o *módulo de* E_A não é muito afetado pelos polos salientes, mas o *ângulo de* E_A é bem diferente com polos salientes do que sem polos salientes.

c) No problema anterior determine a potência e o torque dos itens a) e b

Pólos lisos	Pólos salientes
$E_A = 524,5 \angle 6,1$	$E_A = 524,5 \angle 4,65$
Potência trifásica	Potência trifásica
$P = \frac{3V_\phi E_A}{X_d} \sin \delta$	$P = \frac{3V_\phi E_A}{X_d} \sin \delta + \frac{3V_\phi^2}{2} \left(\frac{X_d - X_q}{X_d X_q} \right) \sin 2\delta$
$P = 802,59 \text{ kW}$	$P = 796,53 \text{ kW}$
Torque trifásico = P/ω	Torque trifásico
$\omega = 1800 \text{ RPM} = 188,5 \text{ rad/seg}$	
$T = 4257,7 \text{ N-m}$	$T = 4225,62 \text{ N-m}$

14.4) Considerações Finais:

X_d pode ser determinado pelo mesmo método utilizado para determinar X_s

X_q ser determinado pelo ensaio de máxima corrente indutiva

X_d e X_q podem ser determinados simultaneamente pelo teste de escorregamento

Outros parâmetros são:

X_1 : Reatância de dispersão que pode ser determinado pelo método de Potier.

Parâmetros transitórios:

X'_d : Reatância transitória de eixo direto

X'_q : Reatância transitória de eixo em quadratura

T'_d : Constante de tempo transitório em curto-circuito de eixo direto

T'_q : Constante de tempo transitório em curto-circuito de eixo em quadratura

Parâmetros subtransitórios:

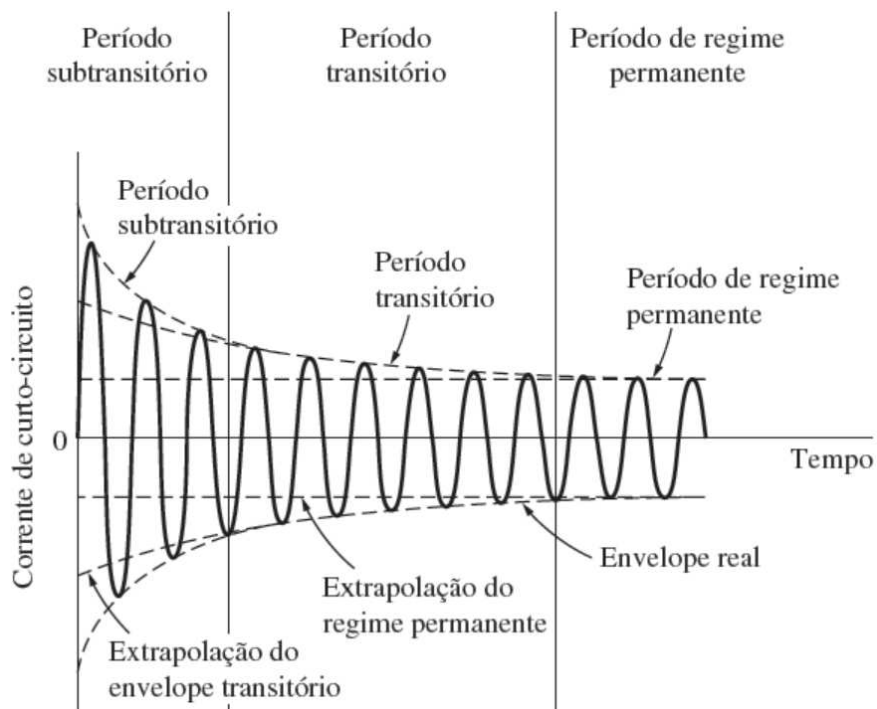
X''_d : Reatância subtransitória de eixo direto

X''_q : Reatância subtransitória de eixo em quadratura

T''_d : Constante de tempo subtransitório em curto-circuito de eixo direto

T''_q : Constante de tempo subtransitório em curto-circuito de eixo em quadratura

Os parâmetros de regime transitório e subtransitório de eixo direto podem ser determinados usando o ensaio de curto-circuito instantâneo. No ensaio, a máquina é acionada em vazio a velocidade síncrona com tensão nominal. Em $t=0$ é curto-circuitada os terminais e é monitorada a corrente que tem o seguinte comportamento.



O decaimento da corrente passa tanto pelo regime subtransitório (dura em torno de 2 ciclos ou 35ms), período transitório (pode durar até 1/2s, até alguns segundos) e período permanente.

A equação que descreve este comportamento é:

$$I_{ac} = E \left[\frac{1}{x_d} + \left(\frac{1}{x'_d} - \frac{1}{x_d} \right) e^{-t/T'_d} + \left(\frac{1}{x''_d} - \frac{1}{x'_d} \right) e^{-t/T''_d} \right]$$

Utilizando um método gráfico para obter os parâmetros da equação anterior.

Na disciplina de “Laboratório de Máquinas Elétricas” é proposta a modelagem e validação de um sistema elétrico de potência onde os estudantes propõem ensaios para validar os diferentes modelos de um sistema de potência montado em laboratório, entre eles, o gerador síncrono.