

Teoria dos polos salientes das máquinas síncronas

O circuito equivalente de um gerador síncrono, desenvolvido no Capítulo 4, é de fato válido apenas para máquinas construídas com rotores cilíndricos e não para máquinas construídas com rotores de polos salientes. Da mesma forma, a expressão da relação entre o ângulo de conjugado δ e a potência fornecida pelo gerador [Equação (4-20)] é válida apenas para rotores cilíndricos. No Capítulo 4, ignoramos os efeitos devidos às saliências nos rotores e assumimos que a teoria simples do rotor cilíndrico poderia ser aplicada. De fato, essa suposição não é ruim quando se trabalha com o regime permanente, mas é bem pobre quando queremos analisar o comportamento transitório de geradores e motores.

O problema com o circuito equivalente simples dos motores de indução é que ele ignora o efeito do *conjugado de relutância* sobre o gerador. Para compreender essa ideia, consulte a Figura C-1. Essa figura mostra um rotor de polos salientes sem enrolamentos dentro de um estator trifásico. Se um campo magnético de estator for produzido como está mostrado na figura, então ele induzirá um campo magnético no rotor. Como é *muito mais* fácil produzir um fluxo ao longo do eixo do rotor do que ortogonal ao eixo, então o fluxo induzido no rotor irá se alinhar com o eixo do rotor. Como há um ângulo entre o campo magnético do estator e o campo magnético do rotor, um conjugado será induzido no rotor, o qual tenderá a alinhar o rotor com o campo do estator. O valor desse conjugado é proporcional ao seno do dobro do ângulo entre os dois campos magnéticos ($\text{sen } 2\delta$).

Como a teoria do rotor cilíndrico das máquinas síncronas ignora o fato de que é mais fácil produzir um campo magnético em algumas direções do que em outras (isto é, ignora o efeito dos conjugados de relutância), essa teoria não é exata quando rotores de polos salientes estão envolvidos.

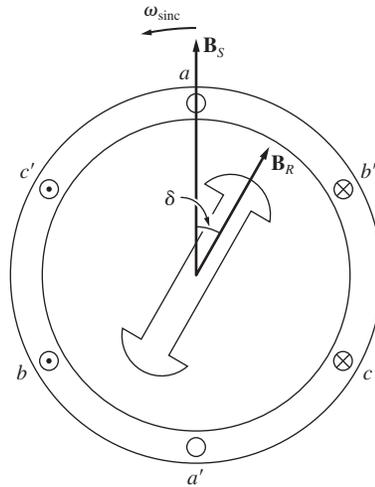


FIGURA C-1

Um rotor de polos salientes, ilustrando a ideia do conjugado de relutância. Um campo magnético é induzido no rotor pelo campo magnético do estator e um conjugado é produzido no rotor que é proporcional ao seno do dobro do ângulo entre os dois campos.

C.1 DESENVOLVIMENTO DO CIRCUITO EQUIVALENTE DE UM GERADOR SÍNCRONO DE POLOS SALIENTES

Como no caso da teoria do rotor cilíndrico, há quatro elementos no circuito equivalente de um gerador síncrono:

1. A tensão gerada interna E_A do gerador
2. A reação de armadura do gerador síncrono
3. A autoindutância do enrolamento do estator
4. A resistência do enrolamento do estator

Na teoria dos polos salientes dos geradores síncronos, o primeiro, o terceiro e o quarto elementos permanecem os mesmos, mas o segundo elemento que trata da reação de armadura deve ser modificado para explicar o fato de que é mais fácil produzir fluxo em algumas direções do que em outras.

Essa modificação dos efeitos da reação de armadura será desenvolvida a seguir. A Figura C-2 mostra um rotor de dois polos salientes girando no sentido anti-horário interior de um estator de dois polos. O fluxo desse rotor é denominado B_R e aponta para cima. Usando a equação da tensão induzida em um condutor que se desloca na presença de um campo magnético, temos

$$e_{\text{ind}} = (\mathbf{v} \times \mathbf{B}) \cdot \mathbf{l} \quad (1-45)$$

A tensão nos condutores da parte superior do estator será para fora da página, positiva, e a tensão nos condutores na parte inferior do estator será para dentro da página. O plano de tensão induzida máxima estará diretamente abaixo do polo do rotor em qualquer instante.

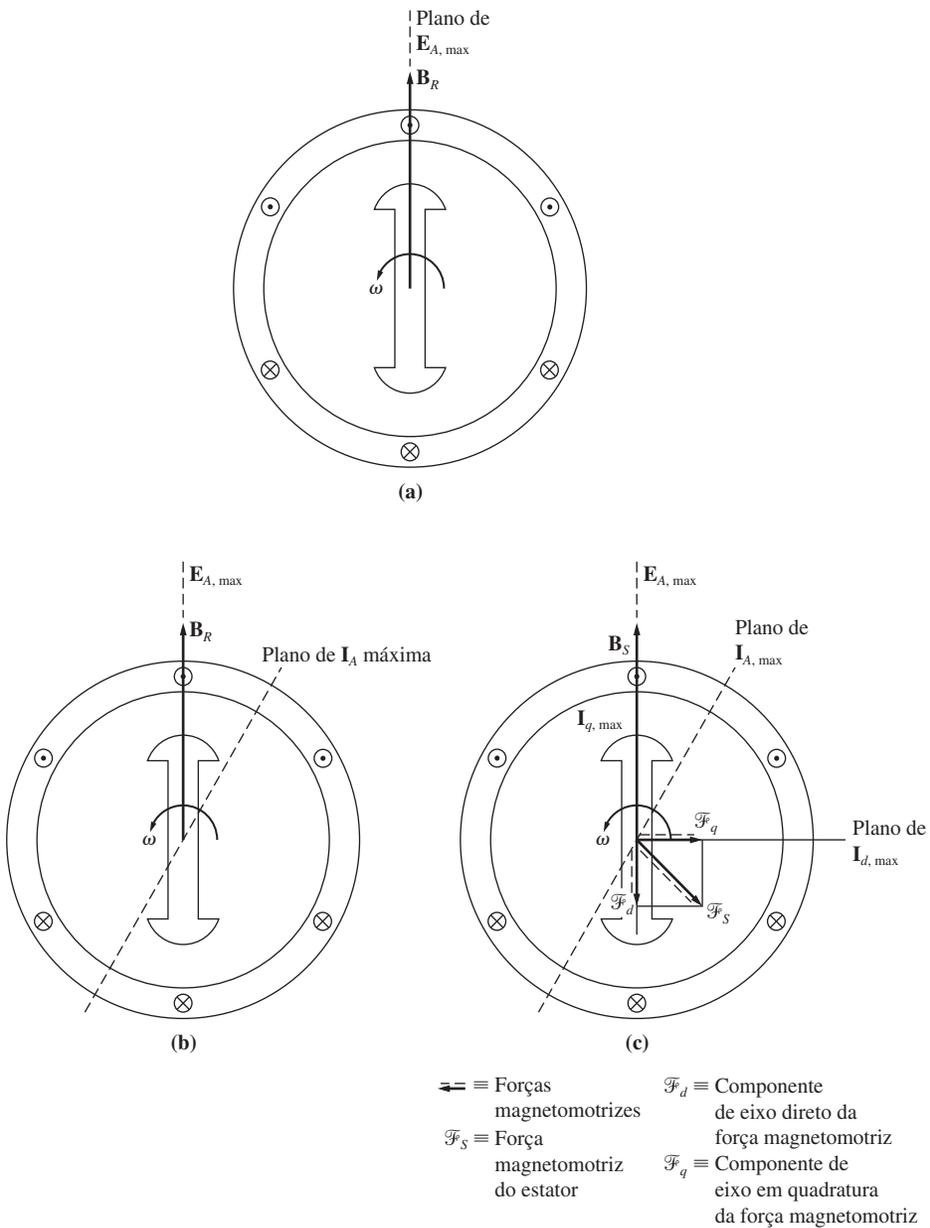


FIGURA C-2

Os efeitos da reação de armadura em um gerador síncrono de polos salientes. (a) O campo magnético do rotor induz uma tensão no estator cujo valor de pico ocorre nos condutores imediatamente abaixo das faces polares. (b) Se uma carga em atraso for conectada ao gerador, então uma corrente de estator circulará cujo valor de pico ocorre em um ângulo atrasado em relação a E_A . (c) Essa corrente de estator I_A produz uma força magnetomotriz no estator da máquina.

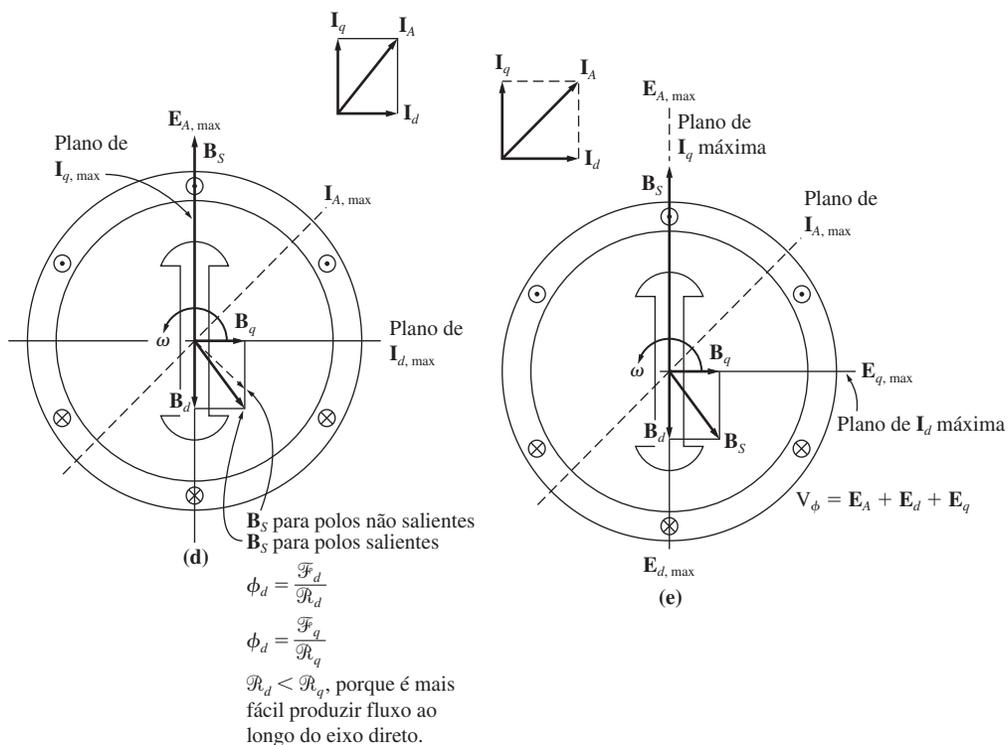


FIGURA C-2 (conclusão)

(d) A força magnetomotriz do estator produz um fluxo de estator \mathbf{B}_S . Entretanto, a componente de eixo direto da força magnetomotriz produz mais fluxo por ampère-espira do que a componente do eixo em quadratura, porque a relutância do caminho de fluxo do eixo direto é menor do que a relutância do caminho de fluxo do eixo em quadratura. (e) Os fluxos de estator de eixos direto e em quadratura produzem tensões de reação de armadura no estator da máquina.

Se agora uma carga em atraso for ligada aos terminais desse gerador, então uma corrente circulará cujo valor de pico estará atrasado em relação à tensão de pico. Essa corrente está mostrada na Figura C-2b.

O fluxo de corrente do estator produz uma força magnetomotriz que está 90° atrasada em relação ao plano da corrente de pico do estator, como está mostrado na Figura C-2c. Na teoria cilíndrica, essa força magnetomotriz produz um campo magnético \mathbf{B}_S de estator que se alinha com a força magnetomotriz do estator. Na realidade, entretanto, é mais fácil produzir um campo magnético na direção do rotor do que em uma direção perpendicular a ele. Portanto, iremos decompor a força magnetomotriz do estator em uma componente paralela e outra perpendicular ao eixo do rotor. Cada uma dessas forças magnetomotrizes produz um campo magnético, mas mais fluxo é produzido por ampère-espira ao longo do eixo do que perpendicularmente (*em quadratura*) ao eixo.

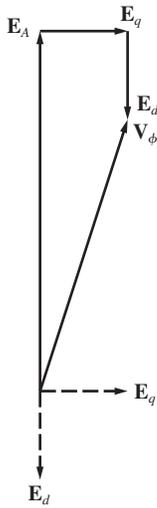


FIGURA C-3

A tensão de fase do gerador é simplesmente a soma da sua tensão gerada interna mais a tensão da reação de armadura.

O campo magnético resultante do estator está mostrado na Figura C-2d, comparado com o campo previsto pela teoria do rotor cilíndrico (polos não salientes).

Agora, cada componente do campo magnético do estator produz uma tensão própria no enrolamento do estator devido à reação de armadura. Essas tensões de reação de armadura estão mostradas na Figura C-2e.

A tensão total no estator é, portanto,

$$\mathbf{V}_\phi = \mathbf{E}_A + \mathbf{E}_d + \mathbf{E}_q \tag{C-1}$$

em que \mathbf{E}_d é a componente de eixo direto da tensão de reação de armadura e \mathbf{E}_q é a componente de eixo em quadratura da tensão de reação de armadura (veja a Figura C-3). Como no caso da teoria do rotor cilíndrico, cada tensão de reação de armadura é *diretamente proporcional à sua corrente de armadura* e está *atrasada de 90°* em relação à corrente do estator. Portanto, cada tensão de reação de armadura pode ser modelada como

$$\mathbf{E}_d = -jx_d \mathbf{I}_d \tag{C-2}$$

$$\mathbf{E}_q = -jx_q \mathbf{I}_q \tag{C-3}$$

e a tensão total de estator torna-se

$$\mathbf{V}_\phi = \mathbf{E}_A - jx_d \mathbf{I}_d - jx_q \mathbf{I}_q \tag{C-4}$$

Agora, devemos incluir a resistência e a autorreatância de armadura. Como a autorreatância de armadura X_A independe do ângulo do rotor, ela é normalmente acrescentada às reatâncias de reação de armadura de eixo direto e de eixo em quadratura para produzir a *reatância síncrona direta* e a *reatância síncrona em quadratura* do gerador:

$$\boxed{X_d = x_d + X_A} \tag{C-5}$$

$$\boxed{X_q = x_q + X_A} \tag{C-6}$$

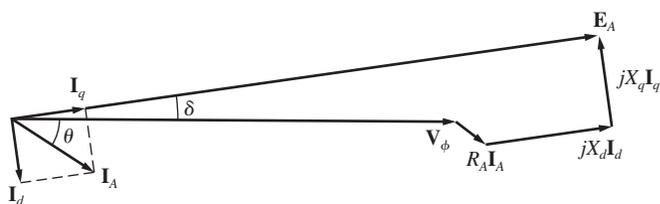


FIGURA C-4
O diagrama fasorial de um gerador com polos salientes.

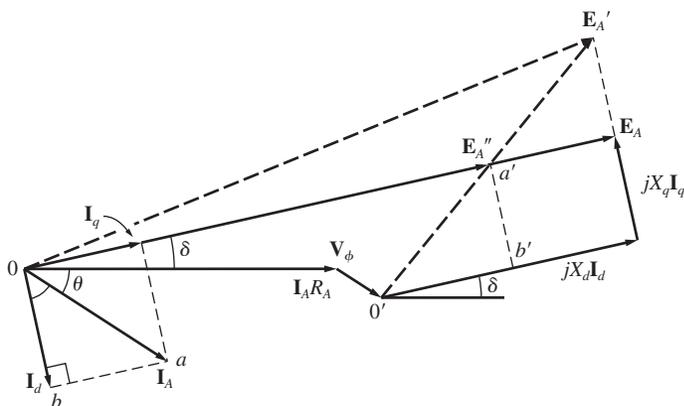


FIGURA C-5
Construção do diagrama fasorial sem nenhum conhecimento prévio de δ . A tensão E_A'' está no mesmo ângulo que E_A e E_A'' poderá ser determinada usando apenas dados obtidos nos terminais do gerador. Portanto, o ângulo δ pode ser encontrado e a corrente pode ser decomposta nas componentes d e q .

A queda de tensão na resistência de armadura é simplesmente a resistência de armadura vezes a corrente de armadura I_A .

Portanto, a expressão final para a tensão de fase em um motor síncrono de polos salientes é

$$\mathbf{V}_\phi = \mathbf{E}_A - jX_d \mathbf{I}_d - jX_q \mathbf{I}_q - R_A \mathbf{I}_A \tag{C-7}$$

e o diagrama fasorial resultante está mostrado na Figura C-4.

Observe que esse diagrama fasorial requer que a corrente de armadura seja decomposta em componentes em paralelo e em quadratura com E_A . Entretanto, o ângulo entre E_A e I_A é $\delta + \theta$, que usualmente não é conhecido antes de se construir o diagrama. Normalmente, somente o ângulo θ do fator de potência é conhecido antecipadamente.

É possível construir o diagrama fasorial sem o conhecimento prévio do ângulo δ , como está mostrado na Figura C-5. As linhas cheias da Figura C-5 são as mesmas linhas mostradas na Figura C-4, ao passo que as linhas tracejadas mostram o diagrama como se a máquina tivesse um rotor cilíndrico com reatância síncrona X_d .

O ângulo δ de \mathbf{E}_A pode ser encontrado usando dados obtidos nos terminais do gerador. Observe que o fasor \mathbf{E}_A'' , dado por

$$\mathbf{E}_A'' = \mathbf{V}_\phi + R_A \mathbf{I}_A + jX_q \mathbf{I}_A \quad (\text{C-8})$$

é colinear com a tensão gerada interna \mathbf{E}_A . Como \mathbf{E}_A'' é determinada pela corrente nos terminais do gerador, o ângulo δ pode ser determinado conhecendo-se a corrente de armadura. Após sabermos qual é o ângulo δ , a corrente de armadura poderá ser decomposta nas componentes direta e em quadratura e a tensão gerada interna poderá ser determinada.

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 \mathbf{E}_A desse gerador a plena carga, assumindo que ele tem um rotor cilíndrico de reatância X_d .
- (b) Encontre a tensão gerada interna \mathbf{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

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

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 \mathbf{E}_A . Essa direção pode ser determinada a partir da Equação (C-8):

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

A direção de \mathbf{E}_A é $\delta = 4,65^\circ$. A componente de eixo direto da corrente é, portanto,

$$\begin{aligned} I_d &= I_A \text{ sen } (\theta + \delta) \\ &= (693 \text{ A}) \text{ sen } (36,87 + 4,65) = 459 \text{ A} \end{aligned}$$

e a componente de eixo em quadratura da corrente é

$$\begin{aligned} I_q &= I_A \cos(\theta + \delta) \\ &= (693 \text{ A}) \cos(36,87 + 4,65) = 519 \text{ A} \end{aligned}$$

Combinando esses valores e os ângulos, temos

$$\begin{aligned} \mathbf{I}_d &= 459 \angle -85,35^\circ \text{ A} \\ \mathbf{I}_q &= 519 \angle 4,65^\circ \text{ A} \end{aligned}$$

A tensão gerada interna resultante é

$$\begin{aligned} \mathbf{E}_A &= \mathbf{V}_\phi + R_A \mathbf{I}_A + jX_d \mathbf{I}_d + jX_q \mathbf{I}_q \\ &= 480 \angle 0^\circ \text{ V} + 0 \text{ V} + j(0,1 \Omega)(459 \angle -85,35^\circ \text{ A}) + j(0,075 \Omega)(519 \angle 4,65^\circ \text{ A}) \\ &= 524,3 \angle 4,65^\circ \text{ V} \end{aligned}$$

Observe que o módulo de \mathbf{E}_A não é muito afetado pelos polos salientes, mas o ângulo de \mathbf{E}_A é bem diferente com polos salientes do que sem polos salientes.

C.2 EQUAÇÕES DE CONJUGADO E POTÊNCIA EM UMA MÁQUINA DE POLOS SALIENTES

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:

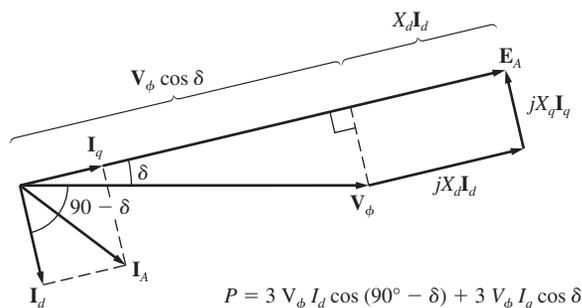


FIGURA C-6

Determinação da potência de saída de um gerador síncrono de polos salientes. As correntes \mathbf{I}_d e \mathbf{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.

PROBLEMAS

C-1 Um gerador síncrono de 13,8 kV, 50 MVA, FP 0,9 atrasado, 60 Hz, quatro polos e ligado em Y, tem uma reatância de eixo direto de 2,5 Ω , uma reatância de eixo em quadratura de 1,8 Ω e uma resistência de armadura de 0,2 Ω . Pode-se assumir que as perdas por atrito, ventilação e suplementares são desprezíveis. A característica de circuito aberto do gerador é dada pela Figura P4-1.

(a) Qual é o valor da corrente de campo necessário para tornar V_T igual a 2300 V quando o gerador está funcionando a vazio?

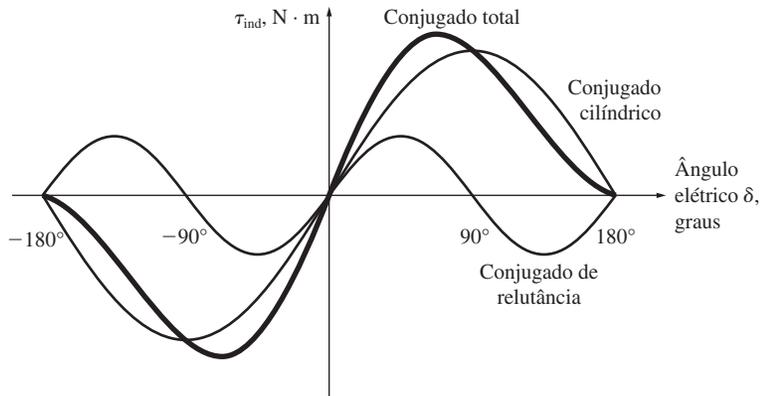


FIGURA C-7

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

- (b) Qual é a tensão gerada interna dessa máquina quando ela está operando nas condições nominais? De que forma o valor de \mathbf{E}_A compara-se com o do Problema 4-2b?
- (c) Que fração da potência a plena carga do gerador é devido ao conjugado de relutância do rotor?
- C-2** Um gerador trifásico acionado com turbina a água, de 14 polos e ligado em Y, tem especificações nominais de 120 MVA, 13,2 kV, FP 0,8 atrasado e 60 Hz. Sua reatância de eixo direto é $0,62 \Omega$ e sua reatância de eixo em quadratura é $0,40 \Omega$. Todas as perdas rotacionais podem ser ignoradas.
- (a) Que valor de tensão gerada interna seria necessário para que esse gerador operasse nas condições nominais?
- (b) Qual é a regulação de tensão do gerador nas condições nominais?
- (c) Faça um gráfico da curva de potência *versus* ângulo de conjugado para esse gerador. Para que ângulo δ , a potência do gerador é máxima?
- (d) De que forma a potência máxima de saída do gerador iria se comparar com a potência máxima disponível, caso seu rotor fosse cilíndrico?
- C-3** Suponha que uma máquina de polos salientes seja usada como motor.
- (a) Desenhe o diagrama fasorial de uma máquina síncrona de polos salientes que é usada como motor.
- (b) Escreva as equações que descrevem as tensões e correntes desse motor.
- (c) Prove que o ângulo de conjugado δ entre \mathbf{E}_A e \mathbf{V}_ϕ do motor é dado por

$$\delta = \arctg \frac{I_A X_q \cos \theta - I_A R_A \sin \theta}{V_\phi + I_A X_q \sin \theta + I_A R_A \cos \theta}$$

- C-4** Se a máquina do Problema C-1 estiver operando como *motor* em condições nominais e *se a corrente de campo for zero*, que o conjugado máximo poderá ser obtido no seu eixo sem que haja deslizamento de polos?