

# Motores síncronos

## OBJETIVOS DE APRENDIZAGEM

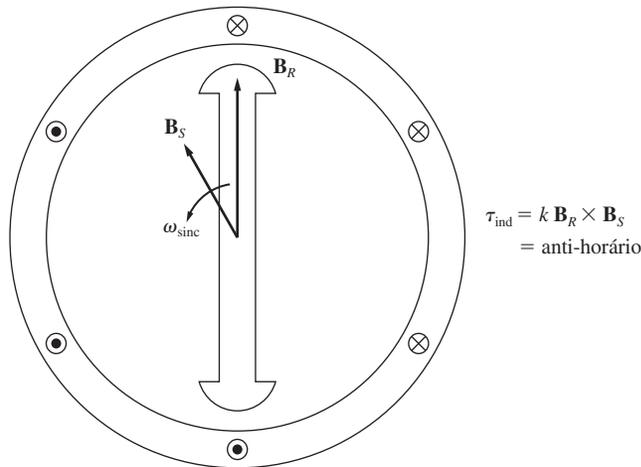
---

- Compreender o circuito equivalente de um motor síncrono.
  - Ser capaz de desenhar diagramas fasoriais para um motor síncrono.
  - Conhecer as equações de potência e conjugado de um motor síncrono.
  - Compreender como e por que o fator de potência varia quando a carga de um motor síncrono aumenta.
  - Compreender como e por que o fator de potência varia quando a corrente de campo de um motor síncrono aumenta – a curva “V”.
  - Compreender como é dada a partida de motores síncronos.
  - Ser capaz de diferenciar se uma máquina síncrona está operando como motor ou como gerador e também se ela está fornecendo ou consumindo potência reativa pelo exame do diagrama fasorial.
  - Compreender as especificações nominais dos motores síncronos.
- 

Motores síncronos são máquinas síncronas usadas para converter potência elétrica em potência mecânica. Este capítulo explora o funcionamento básico dos motores síncronos e estabelece sua relação com os geradores síncronos.

## 5.1 PRINCÍPIOS BÁSICOS DE OPERAÇÃO DE UM MOTOR

Para compreender o conceito básico de motor síncrono, examine a Figura 5-1, a qual mostra um motor síncrono de dois polos. A corrente de campo  $I_F$  do motor produz um campo magnético  $\mathbf{B}_R$  em regime permanente. Um conjunto trifásico de tensões é aplicado ao estator da máquina, produzindo um fluxo trifásico de correntes nos enrolamentos.



**FIGURA 5-1**  
Um motor síncrono de dois polos.

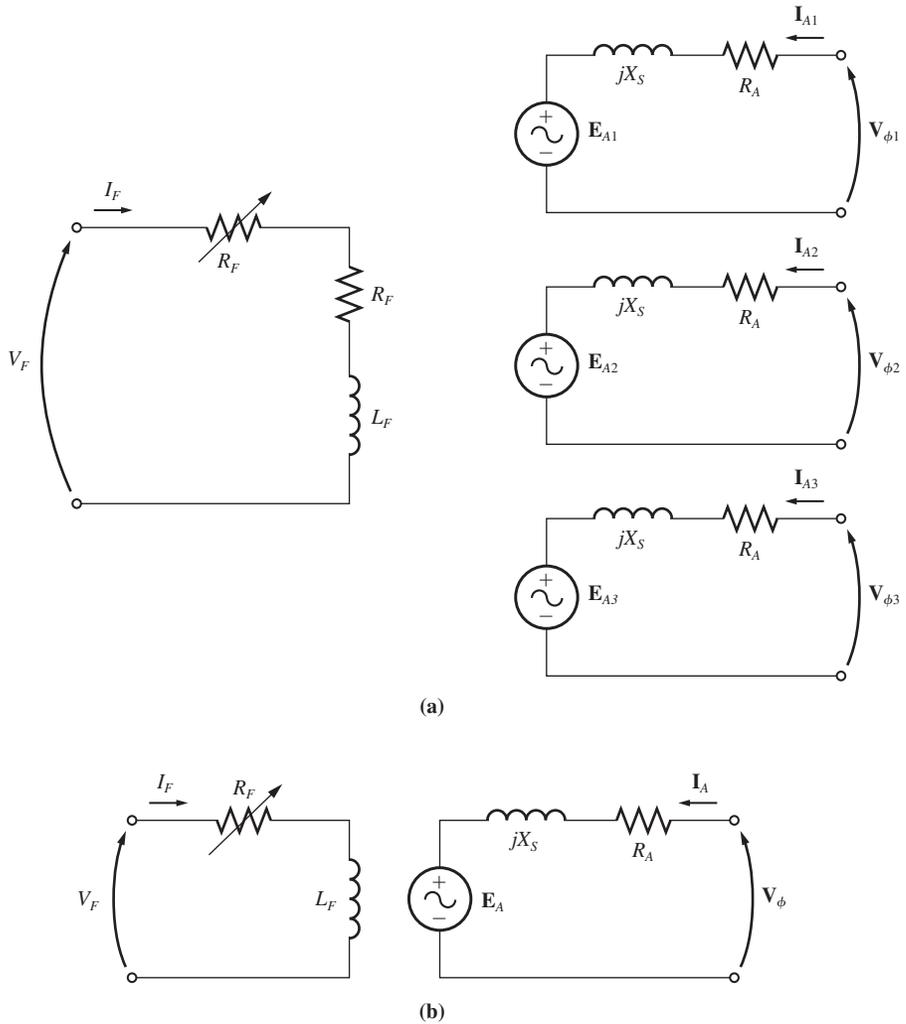
Como foi mostrado no Capítulo 3, um conjunto trifásico de correntes nos enrolamentos de armadura produz um campo magnético uniforme girante  $\mathbf{B}_S$ . Portanto, há dois campos magnéticos presentes na máquina e o *campo do rotor tenderá a se alinhar com o campo do estator*, exatamente como duas barras imantadas tenderão a se alinhar se forem colocadas próximas entre si. Como o campo magnético do estator está girando, o campo magnético do rotor (e o próprio rotor) tentará constantemente se alinhar. Quanto maior for o ângulo entre os dois campos magnéticos (até um certo valor máximo), maior será o conjugado no rotor da máquina. O princípio básico de operação do motor síncrono é que o rotor “persegue” em círculo o campo magnético girante do estator, sem nunca conseguir se alinhar com ele.

Como um motor síncrono é igual fisicamente ao gerador síncrono, todas as equações básicas de velocidade, potência e conjugado dos Capítulos 3 e 4 aplicam-se também aos motores síncronos.

### O circuito equivalente de um motor síncrono

Um motor síncrono é o mesmo que um gerador síncrono sob todos os aspectos, exceto pelo fato de o sentido do fluxo de potência ser invertido. Como esse sentido é invertido, pode-se esperar que o sentido do fluxo de corrente no estator também seja invertido. Portanto, o circuito equivalente de um motor síncrono é exatamente o mesmo que o circuito equivalente de um gerador síncrono, *exceto* pelo fato de o sentido de referência de  $\mathbf{I}_A$  ser *invertido*. O circuito equivalente completo resultante está mostrado na Figura 5-2a e o circuito equivalente por fase está mostrado na Figura 5-2b. Como antes, as três fases do circuito equivalente podem ser ligadas em Y ou em  $\Delta$ .

Devido à mudança no sentido de  $\mathbf{I}_A$ , a equação da lei das tensões de Kirchhoff para o circuito equivalente também muda. A equação para o novo circuito equivalente é



**FIGURA 5-2** (a) O circuito equivalente completo de um motor síncrono trifásico. (b) O circuito equivalente por fase.

$$\mathbf{V}_\phi = \mathbf{E}_A + jX_S \mathbf{I}_A + R_A \mathbf{I}_A \quad (5-1)$$

ou

$$\mathbf{E}_A = \mathbf{V}_\phi - jX_S \mathbf{I}_A - R_A \mathbf{I}_A \quad (5-2)$$

Essa é exatamente a mesma equação de um gerador, exceto pelo fato de o sinal do termo de corrente ter sido invertido.

## O motor síncrono visto da perspectiva do campo magnético

Para começar a entender o funcionamento do motor síncrono examine novamente um gerador síncrono conectado a um barramento infinito. O gerador tem uma máquina motriz aplicada a seu eixo, fazendo-o girar. O sentido do conjugado aplicado  $\tau_{ap}$  pela máquina motriz é no sentido do movimento, porque a máquina motriz é a que está fazendo o gerador girar.

O diagrama fasorial de um gerador que funciona com uma corrente de campo elevada está mostrado na Figura 5-3a e o respectivo diagrama do campo magnético está mostrado na Figura 5-3b. Como descrito anteriormente,  $\mathbf{B}_R$  corresponde a (produz)  $\mathbf{E}_A$ ,  $\mathbf{B}_{liq}$  corresponde a (produz)  $\mathbf{V}_\phi$  e  $\mathbf{B}_S$  corresponde a  $\mathbf{E}_{est} (= -jX_S \mathbf{I}_A)$ . Na figura, a rotação de ambos, diagrama fasorial e diagrama do campo magnético, é no sentido anti-horário, seguindo a convenção matemática padrão de ângulo crescente.

O conjugado induzido no gerador pode ser obtido a partir do diagrama de campo magnético. Das Equações (3-60) e (3-61), o conjugado induzido é dado por

$$\tau_{ind} = k\mathbf{B}_R \times \mathbf{B}_{liq} \quad (3-60)$$

ou 
$$\tau_{ind} = kB_R B_{liq} \text{sen } \delta \quad (3-61)$$

Observe no diagrama de campo magnético que o *conjugado induzido nesta máquina é horário*, opondo-se ao sentido de rotação. Em outras palavras, o conjugado induzido no gerador é um *contraconjugado*, opondo-se à rotação causada pelo conjugado aplicado externo  $\tau_{ap}$ .

Imagine que a máquina motriz repentinamente perdesse potência e, em vez de impelir o eixo no sentido do movimento, ela começasse a ser arrastada pelo eixo da máquina síncrona. Que acontecerá agora à máquina? O rotor perde velocidade devido ao arraste no seu eixo e se atrasa em relação ao campo magnético líquido da máquina (veja a Figura 5-4a). Quando o rotor, e com isso  $\mathbf{B}_R$  também, reduz a velocidade e fica para trás de  $\mathbf{B}_{liq}$ , o funcionamento da máquina muda repentinamente. Pela Equação (3-60), quando  $\mathbf{B}_R$  está atrasado em relação a  $\mathbf{B}_{liq}$ , o sentido do conjugado induzido inverte-se e torna-se anti-horário. Em outras palavras, agora o conjugado da máquina é no sentido do movimento e a máquina está atuando como motor. O aumento do ângulo de conjugado  $\delta$  resulta em um conjugado cada

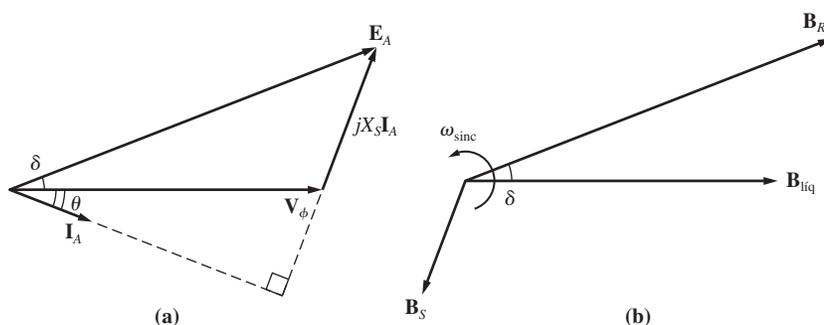
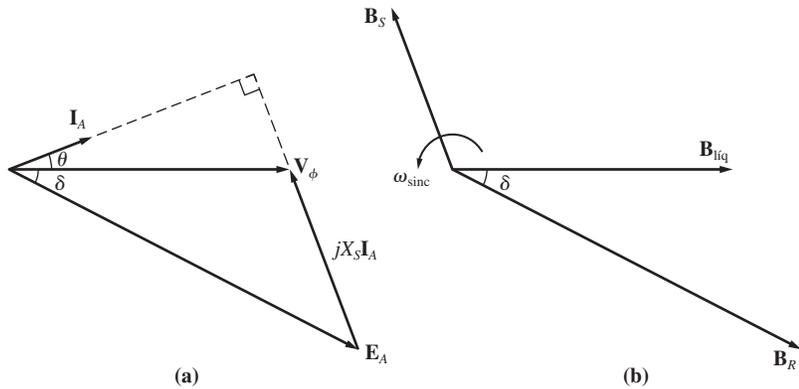


FIGURA 5-3

- (a) Diagrama fasorial de um gerador síncrono operando com um fator de potência atrasado.  
 (b) O respectivo diagrama de campo magnético.



**FIGURA 5-4**  
 (a) Diagrama fasorial de um motor síncrono. (b) O respectivo diagrama de campo magnético.

vez maior no sentido de rotação até que finalmente o conjugado induzido do motor torna-se igual ao conjugado de carga no seu eixo. Nesse ponto, a máquina estará operando em regime permanente e novamente com velocidade síncrona, mas agora como motor.

O diagrama fasorial correspondente ao funcionamento como gerador está mostrado na Figura 5-3a e o diagrama fasorial correspondente ao funcionamento como motor está mostrado na Figura 5-4a. A razão de  $jX_s I_A$  apontar de  $V_\phi$  para  $E_A$  no gerador e de  $E_A$  para  $V_\phi$  no motor é que o sentido de referência de  $I_A$  foi invertido na definição do circuito equivalente do motor. A diferença básica entre o funcionamento como motor e como gerador nas máquinas síncronas pode ser vista tanto no diagrama de campo magnético quanto no diagrama fasorial. *Em um gerador*,  $E_A$  está à frente de  $V_\phi$  e  $B_R$  está à frente de  $B_{liq}$ . *Em um motor*,  $E_A$  está atrás de  $V_\phi$  e  $B_R$  está atrás de  $B_{liq}$ . Em um motor, o conjugado induzido é no sentido do movimento e, em um gerador, o conjugado induzido é um contraconjugado que se opõe ao sentido do movimento.

## 5.2 OPERAÇÃO DO MOTOR SÍNCRONO EM REGIME PERMANENTE

Esta seção explora o comportamento dos motores síncronos em condições variáveis de carga e de corrente de campo, assim como a questão da correção do fator de potência quando são usados motores síncronos. Por simplicidade, as discussões seguintes geralmente ignorarão a resistência de armadura dos motores. Entretanto,  $R_A$  será considerada em alguns dos cálculos numéricos trabalhados.

### A curva característica de conjugado versus velocidade do motor síncrono

Os motores síncronos fornecem potência às cargas, que basicamente são dispositivos que funcionam com velocidade constante. Usualmente, os motores são ligados a sistemas de potência que são *muito* maiores do que eles próprios, de modo que os sistemas de potência atuam como barramentos infinitos para os motores. Isso signifi-

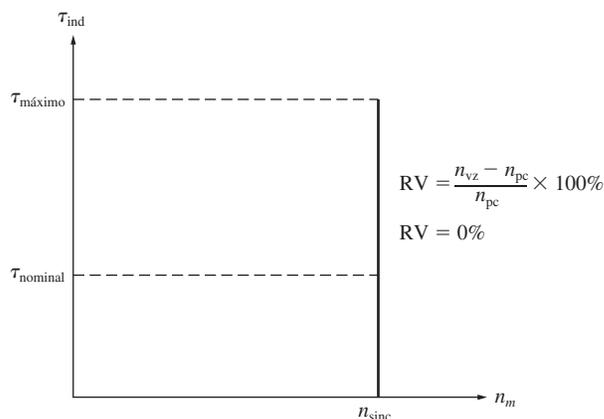


FIGURA 5-5

A característica de conjugado *versus* velocidade de um motor síncrono. Como a velocidade do motor é constante, sua regulação de velocidade (RV) é zero.

ca que a tensão de terminal e a frequência do sistema serão constantes, independentemente da quantidade de potência demandada pelo motor. A velocidade de rotação do motor está sincronizada com a taxa de rotação dos campos magnéticos e, por sua vez, a taxa de rotação dos campos magnéticos aplicados está sincronizada com a frequência elétrica aplicada, de modo que *a velocidade do motor síncrono será constante independentemente da carga*. Essa taxa fixa de rotação é dada por

$$n_m = \frac{120 f_{se}}{P} \quad (5-3)$$

em que  $n_m$  é a velocidade mecânica de rotação,  $f_{se}$  é a frequência elétrica do estator e  $P$  é o número de polos do motor.

A curva característica de conjugado *versus* velocidade está mostrada na Figura 5-5. A velocidade de regime permanente do motor é constante desde a vazio até o conjugado máximo que o motor pode fornecer (denominado *conjugado máximo*), de modo que a regulação de velocidade desse motor [Equação (3-68)] é 0 %. A equação de conjugado é

$$\tau_{\text{ind}} = k B_R B_{\text{liq}} \text{sen } \delta \quad (3-61)$$

ou

$$\tau_{\text{ind}} = \frac{3 V_\phi E_A \text{sen } \delta}{\omega_m X_S} \quad (4-22)$$

O conjugado máximo ocorre quando  $\delta = 90^\circ$ . Entretanto, os conjugados normais a plena carga são muito inferiores a esse valor. De fato, o conjugado máximo pode ser tipicamente o triplo do conjugado a plena carga da máquina.

Quando o conjugado no eixo de um motor síncrono excede o conjugado máximo, o rotor poderá perder o sincronismo com o estator e os campos magnéticos líquidos. Em vez disso, o rotor começa a “deslizar”, ficando para trás. Quando o rotor

perde velocidade, o campo magnético do estator continua girando, ultrapassando diversas vezes o campo do rotor. O sentido do conjugado induzido no rotor é invertido a cada ultrapassagem. Os surtos resultantes de conjugado são muitos intensos, primeiro em um sentido e em seguida no outro, fazendo com que o motor entre gravemente em vibração. A perda de sincronismo depois que o conjugado máximo é excedido é conhecida como polos deslizantes.

O conjugado máximo do motor é dado por

$$\tau_{\text{máx}} = k B_R B_{\text{líq}} \tag{5-4a}$$

ou

$$\tau_{\text{máx}} = \frac{3 V_{\phi} E_A}{\omega_m X_S} \tag{5-4b}$$

*Essas equações mostram que, quanto maior a corrente de campo (e consequentemente  $E_A$ ), maior será o conjugado máximo do motor. Portanto, há uma vantagem de estabilidade quando o motor funciona com corrente de campo ou  $E_A$  elevadas.*

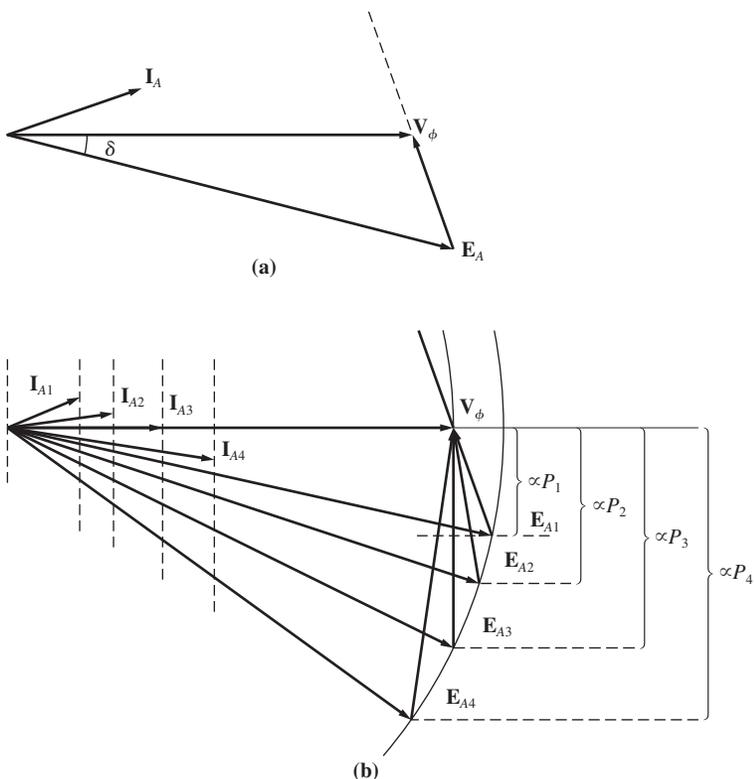
### O efeito das mudanças de carga sobre um motor síncrono

Se uma carga for acoplada ao eixo de um motor síncrono, o motor desenvolverá conjugado suficiente para manter o motor e sua carga girando na velocidade síncrona. Que acontece quando a carga é alterada no motor síncrono?

Para descobrir, examine um motor síncrono operando inicialmente com um fator de potência adiantado, como está mostrado na Figura 5-6. Se a carga no eixo do motor for aumentada, o rotor inicialmente reduzirá sua velocidade, Ao fazer isso, o ângulo de conjugado  $\delta$  torna-se maior e o conjugado induzido aumenta. O incremento no conjugado induzido acelerará o motor, que voltará a girar na velocidade síncrona, mas com um ângulo de conjugado  $\delta$  maior.

Qual é a aparência do diagrama fasorial durante esse processo? Para descobrir, examine as restrições impostas à máquina durante uma alteração de carga. A Figura 5-6a mostra o diagrama fasorial do motor antes do aumento de carga. A tensão gerada interna  $E_A$  é igual a  $K\phi\omega$  e, portanto, depende *somente* da corrente de campo e da velocidade da máquina. A velocidade está condicionada a ser constante pela fonte de potência de entrada e, como ninguém mexeu no circuito de campo, a corrente de campo também é constante. Portanto,  $|E_A|$  deve ser constante quando a carga é alterada. Os comprimentos proporcionais à potência ( $E_A \text{ sen } \delta$  e  $I_A \text{ cos } \theta$ ) aumentarão, mas o módulo de  $E_A$  deverá permanecer constante. Quando a carga aumenta,  $E_A$  move-se para baixo do modo mostrado na Figura 5-6b. Quando  $E_A$  move-se mais e mais para baixo, o termo  $jX_S I_A$  deve aumentar para que possa ir da extremidade de  $E_A$  até  $V_{\phi}$  e, consequentemente, a corrente de armadura  $I_A$  também aumentará. Observe que o ângulo  $\theta$  do fator de potência também se altera, tornando-se cada vez menos adiantado e, em seguida, cada vez mais atrasado.

**EXEMPLO 5-1** Um motor síncrono de 208 V, 45 HP, FP 0,8 adiantado, ligado em  $\Delta$  e 60 Hz tem uma reatância síncrona de 2,5  $\Omega$  e uma resistência de armadura desprezível. Suas perdas por atrito e ventilação são 1,5 kW e as perdas no núcleo são 1,0 kW. Inicialmente, o eixo está impulsionando uma carga de 15 HP e o fator de potência do motor é 0,80 adiantado.



**FIGURA 5-6**  
 (a) Diagrama fasorial de um motor operando com um fator de potência adiantado. (b) O efeito de um aumento de carga sobre o funcionamento de um motor síncrono.

- (a) Desenhe o diagrama fasorial desse motor e encontre os valores de  $I_A$ ,  $I_L$  e  $E_A$ .
- (b) Agora, assuma que a carga no eixo seja aumentada para 30 HP. Desenhe o comportamento do diagrama fasorial em resposta a esse aumento.
- (c) Encontre  $I_A$ ,  $I_L$  e  $E_A$  após a alteração de carga. Qual é o novo fator de potência?

**Solução**

(a) Inicialmente, a potência de saída do motor é 15 HP. Isso corresponde a uma saída de

$$P_{\text{saída}} = (15 \text{ HP})(0,746 \text{ kW/HP}) = 11,19 \text{ kW}$$

Portanto, a potência elétrica fornecida à máquina é

$$\begin{aligned} P_{\text{entrada}} &= P_{\text{saída}} + P_{\text{perdas mec.}} + P_{\text{perdas núcleo}} + P_{\text{perdas eletr.}} \\ &= 11,19 \text{ kW} + 1,5 \text{ kW} + 1,0 \text{ kW} + 0 \text{ kW} = 13,69 \text{ kW} \end{aligned}$$

Como o fator de potência do motor é 0,8 adiantado, a corrente de linha resultante é

$$\begin{aligned} I_L &= \frac{P_{\text{entrada}}}{\sqrt{3} V_T \cos \theta} \\ &= \frac{13,69 \text{ kW}}{\sqrt{3}(208 \text{ V})(0,80)} = 47,5 \text{ A} \end{aligned}$$

e a corrente de armadura é  $I_L/\sqrt{3}$  com o fator de potência 0,8 adiantado, o que dá o resultado

$$\mathbf{I}_A = 27,4 \angle 36,87^\circ \text{ A}$$

Para encontrar  $\mathbf{E}_A$ , aplique a lei das tensões de Kirchoff [Equação (5-2)]:

$$\begin{aligned} \mathbf{E}_A &= \mathbf{V}_\phi - jX_S \mathbf{I}_A \\ &= 208 \angle 0^\circ \text{ V} - (j2,5 \Omega)(27,4 \angle 36,87^\circ \text{ A}) \\ &= 208 \angle 0^\circ \text{ V} - 68,5 \angle 126,87^\circ \text{ V} \\ &= 249,1 - j54,8 \text{ V} = 255 \angle -12,4^\circ \text{ V} \end{aligned}$$

O diagrama fasorial resultante está mostrado na Figura 5-7a.

(b) Quando a potência no eixo é aumentada para 30 HP, o eixo desacelera momentaneamente e a tensão gerada interna  $\mathbf{E}_A$  oscila para um ângulo maior  $\delta$ , mantendo constante o módulo. O diagrama fasorial resultante está mostrado na Figura 5-7b.

(c) Após a alteração de carga, a potência elétrica de entrada da máquina torna-se

$$\begin{aligned} P_{\text{entrada}} &= P_{\text{saída}} + P_{\text{perdas mec.}} + P_{\text{perdas núcleo}} + P_{\text{perdas eletr.}} \\ &= (30 \text{ HP})(0,746 \text{ kW/HP}) + 1,5 \text{ kW} + 1,0 \text{ kW} + 0 \text{ kW} \\ &= 24,88 \text{ kW} \end{aligned}$$

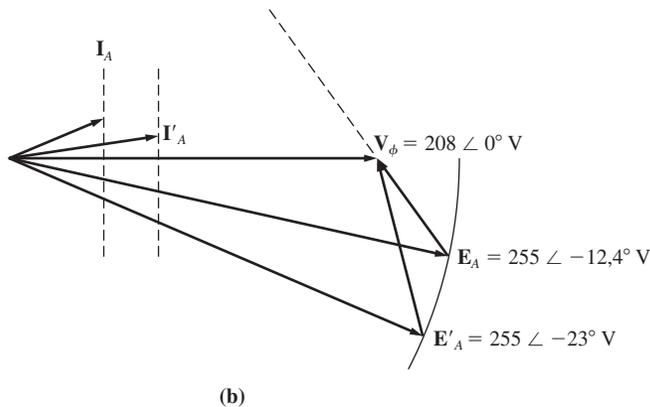
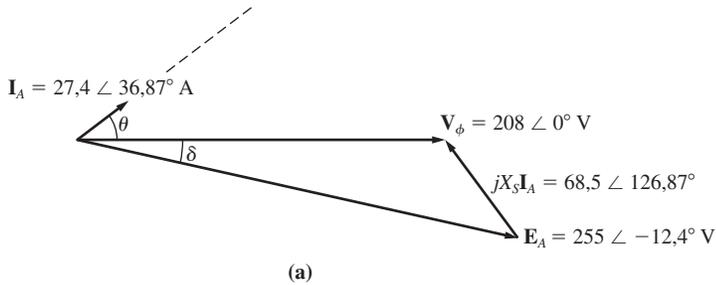


FIGURA 5-7

(a) Diagrama fasorial do motor do Exemplo 5-1a. (b) Diagrama fasorial do motor do Exemplo 5-1b.

Da equação que fornece a potência em termos do ângulo de conjugado [Equação (4-20)], é possível encontrar o valor do ângulo  $\delta$  (lembre-se de que o módulo de  $\mathbf{E}_A$  é constante):

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

$$\begin{aligned} \text{ou} \quad \delta &= \arcsen \frac{X_S P}{3V_\phi E_A} \\ &= \arcsen \frac{(2,5 \Omega)(24,88 \text{ kW})}{3(208 \text{ V})(255 \text{ V})} \\ &= \arcsen 0,391 = 23^\circ \end{aligned}$$

Assim, a tensão gerada interna torna-se  $\mathbf{E}_A = 355 \angle -23^\circ \text{ V}$ . Portanto,  $\mathbf{I}_A$  será dada por

$$\begin{aligned} \mathbf{I}_A &= \frac{\mathbf{V}_\phi - \mathbf{E}_A}{jX_S} \\ &= \frac{208 \angle 0^\circ \text{ V} - 255 \angle -23^\circ \text{ V}}{j2,5 \Omega} \\ &= \frac{103,1 \angle 105^\circ \text{ V}}{j2,5 \Omega} = 41,2 \angle 15^\circ \text{ A} \end{aligned}$$

e  $I_L$  torna-se

$$I_L = \sqrt{3} I_A = 71,4 \text{ A}$$

O fator de potência final será  $\cos(-15^\circ)$  ou 0,966 adiantado.

## O efeito das mudanças de corrente de campo sobre um motor síncrono

Vimos como uma alteração de carga no eixo de um motor síncrono afeta o motor. Em um motor síncrono, há outra grandeza que pode ser facilmente ajustada – sua corrente de campo. Que efeito tem uma variação de corrente de campo sobre um motor síncrono?

Para descobrir, examine a Figura 5-8. A parte a da figura mostra um motor síncrono operando inicialmente com um fator de potência atrasado. Agora, aumente sua corrente de campo e veja o que acontece ao motor. Observe que *uma elevação da corrente de campo aumenta o módulo de  $\mathbf{E}_A$ , mas não afeta a potência ativa fornecida pelo motor*. A potência fornecida pelo motor muda somente quando o conjugado de carga no eixo varia. Como uma mudança em  $I_F$  não afeta a velocidade no eixo  $n_m$  e, como a carga acoplada ao eixo não se altera, a potência ativa fornecida não muda. Naturalmente,  $V_T$  também é constante, porque ela é mantida assim pela fonte de potência que alimenta o motor. Os comprimentos proporcionais à potência no diagrama fasorial ( $E_A \text{ sen } \delta$  e  $I_A \text{ cos } \theta$ ) devem, portanto, ser constantes. Quando a corrente de campo é aumentada, a tensão  $\mathbf{E}_A$  deve crescer, mas ela só pode fazer isso seguindo a linha de potência constante. Esse efeito está mostrado na Figura 5-8b.

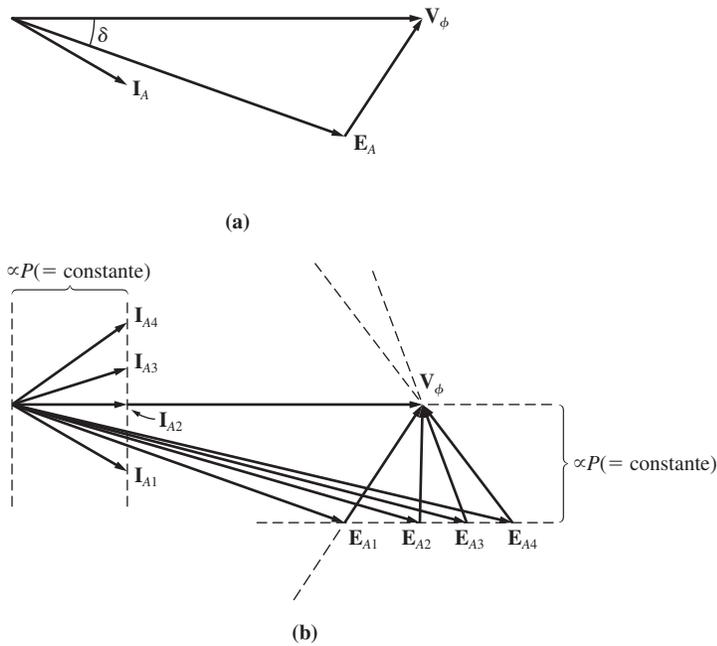
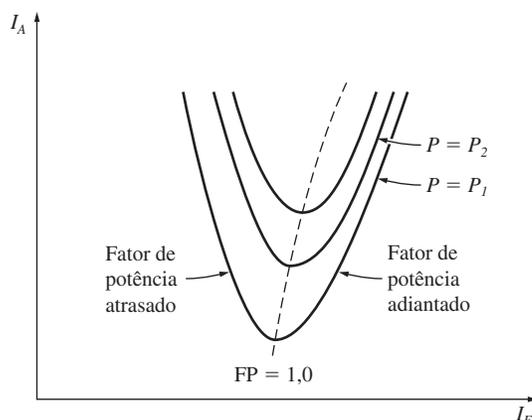


FIGURA 5-8

(a) Um motor síncrono operando com um fator de potência atrasado. (b) O efeito de um aumento de corrente de campo sobre o funcionamento do motor.

Observe que, quando o valor de  $E_A$  aumenta, o módulo da corrente de armadura  $I_A$  primeiro diminui e em seguida cresce novamente. Com valores baixos de  $E_A$ , a corrente de armadura está atrasada e o motor é uma carga indutiva. Ele está funcionando como uma combinação de indutor e resistor, consumindo potência reativa  $Q$ . Quando a corrente de campo é aumentada, a corrente de armadura acaba alinhando-se com  $V_\phi$  e o motor aparecerá como uma resistência pura. Quando a corrente de campo for novamente aumentada, a corrente de armadura torna-se adiantada e o motor torna-se uma carga capacitiva. Agora, ele está funcionando como uma combinação de capacitor e resistor, consumindo potência reativa negativa  $-Q$  ou, alternativamente, fornecendo potência reativa  $Q$  ao sistema.

Um gráfico de  $I_A$  versus  $I_F$  para um motor síncrono está mostrado na Figura 5-9. Esse gráfico é denominado *curva V de um motor síncrono*, pela razão óbvia de que sua forma é como a letra V. Há diversas curvas V desenhadas, correspondendo a diferentes níveis de potência ativa. Para cada curva, a corrente de armadura mínima ocorre com o fator de potência unitário, quando somente potência ativa está sendo fornecida ao motor. Em qualquer outro ponto da curva, alguma potência reativa também estará sendo fornecida para ou pelo motor. Para correntes de campo *menores* do que o valor que corresponde a  $I_A$  mínima, a corrente de armadura está atrasada, consumindo  $Q$ . Para correntes de campo *maiores* do que o valor que corresponde a  $I_A$  mínima, a corrente de armadura está adiantada, fornecendo  $Q$  ao sistema de potência,



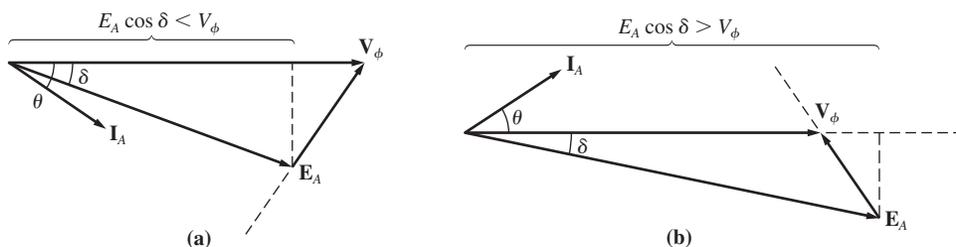
**FIGURA 5-9**  
Curvas V do motor síncrono.

como um capacitor faria. Portanto, controlando a corrente de campo de um motor síncrono, poderemos controlar a *potência reativa* fornecida ou consumida pelo sistema de potência.

Quando a projeção do fasor  $\mathbf{E}_A$  sobre  $\mathbf{V}_\phi$  ( $E_A \cos \delta$ ) é *menor* do que o próprio  $\mathbf{V}_\phi$ , um motor síncrono tem uma corrente atrasada e consome  $Q$ . Como a corrente de campo é pequena nessa situação, diz-se que o motor está *subexcitado*. Por outro lado, quando a projeção de  $\mathbf{E}_A$  sobre  $\mathbf{V}_\phi$  é *maior* do que o próprio  $\mathbf{V}_\phi$ , um motor síncrono tem uma corrente adiantada e fornece  $Q$  ao sistema de potência. Como a corrente de campo é grande nessa situação, diz-se que o motor está *sobre-excitado*. Diagramas fasoriais ilustrando esses conceitos estão mostrados na Figura 5-10.

**EXEMPLO 5-2** O motor síncrono do exemplo anterior de 208 V, 45 HP, FP 0,8 adiantado, ligado em  $\Delta$  e 60 Hz está alimentando uma carga de 15 HP com um fator de potência inicial de FP 0,85 atrasado. A corrente de campo  $I_F$  nessas condições é 4,0 A.

- Desenhe o diagrama fasorial inicial desse motor e encontre os valores  $\mathbf{I}_A$  e  $\mathbf{E}_A$ .
- Se o fluxo do motor for incrementado em 25%, desenhe o novo diagrama fasorial do motor. Quais são agora os valores de  $\mathbf{E}_A$ ,  $\mathbf{I}_A$  e o fator de potência do motor?



**FIGURA 5-10**  
(a) O diagrama fasorial de um motor síncrono *subexcitado*. (b) O diagrama fasorial de um motor síncrono *sobre-excitado*.

- (c) Assuma que o fluxo no motor varie linearmente com a corrente de campo  $I_F$ . Faça um gráfico de  $I_A$  versus  $I_F$  para o motor síncrono com uma carga de 15 HP.

**Solução**

- (a) Do exemplo anterior, a potência elétrica de entrada com todas as perdas incluídas é  $P_{\text{entrada}} = 13,69 \text{ kW}$ . Como o fator de potência do motor é 0,85 atrasado, o fluxo de corrente de armadura resultante é

$$I_A = \frac{P_{\text{entrada}}}{3V_\phi \cos \theta}$$

$$= \frac{13,69 \text{ kW}}{3(208 \text{ V})(0,85)} = 25,8 \text{ A}$$

O ângulo  $\theta$  é  $\arccos 0,85 = 31,8^\circ$ , de modo que a corrente fasorial  $\mathbf{I}_A$  é igual a

$$\mathbf{I}_A = 25,8 \angle 31,8^\circ \text{ A}$$

Para encontrar  $\mathbf{E}_A$ , aplique a lei das tensões de Kichhoff [Equação (5-2)]:

$$\begin{aligned} \mathbf{E}_A &= \mathbf{V}_\phi - jX_S \mathbf{I}_A \\ &= 208 \angle 0^\circ \text{ V} - (j2,5 \Omega)(25,8 \angle -31,8^\circ \text{ A}) \\ &= 208 \angle 0^\circ \text{ V} - 64,5 \angle 58,2^\circ \text{ V} \\ &= 182 \angle -17,5^\circ \text{ V} \end{aligned}$$

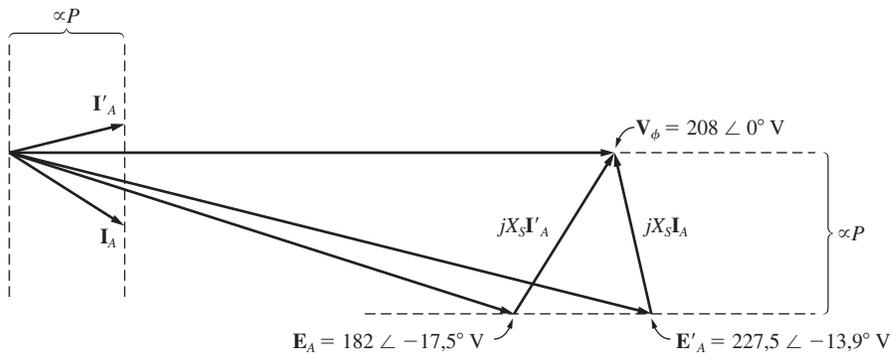
O diagrama fasorial resultante está mostrado na Figura 5-11, juntamente com os resultados da parte b.

- (b) Se o fluxo  $\phi$  for incrementado em 25%,  $E_A = K\phi\omega$  também aumentará em 25%:

$$E_{A2} = 1,25 E_{A1} = 1,25(182 \text{ V}) = 227,5 \text{ V}$$

Entretanto, a potência fornecida à carga deve permanecer constante. Como o comprimento  $E_A \text{ sen } \delta$  é proporcional à potência, esse comprimento no diagrama fasorial deverá ser constante entre o nível do fluxo original e o nível do novo fluxo. Portanto,

$$E_{A1} \text{ sen } \delta_1 = E_{A2} \text{ sen } \delta_2$$



**FIGURA 5-11**  
Diagrama fasorial do motor do Exemplo 5-2.

$$\begin{aligned}\delta_2 &= \arcsen\left(\frac{E_{A1}}{E_{A2}} \sen \delta_1\right) \\ &= \arcsen\left[\frac{182 \text{ V}}{227,5 \text{ V}} \sen(-17,5^\circ)\right] = -13,9^\circ\end{aligned}$$

Agora, a corrente de armadura pode ser encontrada a partir da lei das tensões de Kirchhoff:

$$\begin{aligned}\mathbf{I}_{A2} &= \frac{\mathbf{V}_\phi - \mathbf{E}_{A2}}{jX_S} \\ \mathbf{I}_A &= \frac{208 \angle 0^\circ \text{ V} - 227,5 \angle -13,9^\circ \text{ V}}{j2,5 \Omega} \\ &= \frac{56,2 \angle 103,2^\circ \text{ V}}{j2,5 \Omega} = 22,5 \angle 13,2^\circ \text{ A}\end{aligned}$$

Finalmente, o fator de potência do motor é

$$\text{FP} = \cos(13,2^\circ) = 0,974 \quad \text{adiantado}$$

O diagrama fasorial resultante também está mostrado na Figura 5-11.

- (c) Como foi assumido que o fluxo irá variar linearmente com a corrente de campo,  $E_A$  também irá variar linearmente com a corrente de campo. Sabemos que  $E_A$  é 182 V para uma corrente de campo de 4,0 A, de modo que  $E_A$  para qualquer corrente de campo dada pode ser encontrada a partir da razão

$$\frac{E_{A2}}{182 \text{ V}} = \frac{I_{F2}}{4,0 \text{ A}}$$

$$\text{ou} \quad E_{A2} = 45,5 I_{F2} \quad (5-5)$$

O ângulo de conjugado  $\delta$  para qualquer corrente de campo dada pode ser encontrado a partir do fato de que a carga deve permanecer constante:

$$E_{A1} \sen \delta_1 = E_{A2} \sen \delta_2$$

$$\text{de modo que} \quad \delta_2 = \arcsen\left(\frac{E_{A1}}{E_{A2}} \sen \delta_1\right) \quad (5-6)$$

Essas duas peças de informação nos darão a tensão fasorial  $\mathbf{E}_A$ . Como  $\mathbf{E}_A$  está disponível, a nova corrente de armadura pode ser calculada a partir da lei de Kirchhoff das tensões:

$$\mathbf{I}_{A2} = \frac{\mathbf{V}_\phi - \mathbf{E}_{A2}}{jX_S} \quad (5-7)$$

Um programa (*M-file*) de MATLAB para calcular e plotar  $I_A$  versus  $I_F$ , usando as Equações (5-5) a (5-7) está mostrado a seguir:

```
% M-file: v_curve.m
% M-file para criar um gráfico da corrente de armadura versus a
% corrente de campo para o motor síncrono do Exemplo 5-2

% Primeiro, inicialize os valores da corrente de campo (21 valores
% no intervalo 3,8 a 5,8 A)
i_f = (38:1:58) / 10;

% Agora, inicialize todos os demais valores
i_a = zeros(1,21);           % Prepare a matriz i_a
x_s = 2.5;                   % Reatância síncrona
```

```

v_phase = 208; % Tensão de fase em 0 graus
deltal = -17.5 * pi/180; % delta 1 em radianos
e_a1 = 182 * (cos(deltal) + j * sin(deltal));

% Calcule a corrente de armadura para cada valor
for ii = 1:21
    % Calcule o valor de e_a2
    e_a2 = 45.5 * i_f(ii);

    % Calcule delta2
    delta2 = asin (abs(e_a1) / abs(e_a2) * sin(deltal));

    % Calcule o fasor e_a2
    e_a2 = e_a2 * (cos(delta2) + j * sin(delta2));

    % Calcule i_a
    i_a(ii) = (v_phase - e_a2) / (j * x_s);
end

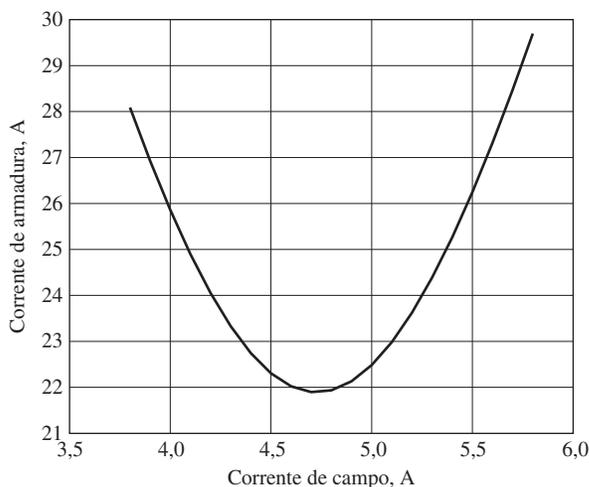
% Plote a curva V
plot(i_f,abs(i_a),'Color','k','Linewidth',2.0);
xlabel('Corrente de campo (A)','Fontweight','Bold');
ylabel('Corrente de armadura (A)','Fontweight','Bold');
title('Curva V de Motor Síncrono','Fontweight','Bold');
grid on;

```

O gráfico produzido por esse *M-file* está mostrado na Figura 5-12. Observe que, para uma corrente de campo de 4,0 A, a corrente de armadura é 25,8 A. Esse resultado está de acordo com a parte *a* deste exemplo.

## O motor síncrono e a correção do fator de potência

A Figura 5-13 mostra um barramento infinito cuja saída está ligada por meio de uma linha de transmissão a uma planta industrial em um ponto distante. A planta mos-



**FIGURA 5-12**

Curva V para o motor síncrono do Exemplo 5-2.

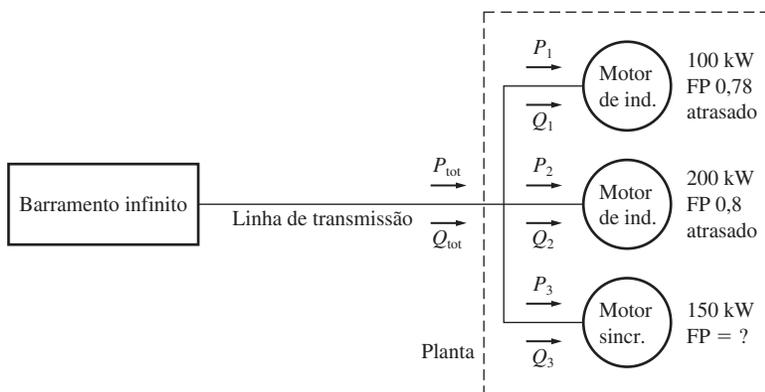


FIGURA 5-13

Um sistema de potência simples consistindo em um barramento infinito que alimenta uma planta industrial por meio de uma linha de transmissão.

trada consiste em três cargas. Duas das cargas são motores de indução, com fatores de potência atrasados, e a terceira carga é um motor síncrono, com fator de potência variável.

Qual é o efeito que a capacidade de alterar o fator de potência de uma das cargas tem sobre o sistema de potência? Para descobrir, examine o seguinte exemplo. (*Nota:* uma revisão das equações de potência trifásica e seus usos é dada no Apêndice A. Alguns leitores talvez queiram consultá-lo para resolver este problema.)

**EXEMPLO 5-3** O barramento infinito da Figura 5-13 opera em 480 V. A carga 1 é um motor de indução que consome 100 kW, com FP 0,78 atrasado, e a carga 2 é um motor de indução que consome 200 kW, com FP 0,8 atrasado. A carga 3 é um motor síncrono cujo consumo de potência ativa é 150 kW.

- Se o motor síncrono for ajustado para operar com FP 0,85 atrasado, qual será a corrente na linha de transmissão nesse sistema?
- Se o motor síncrono for ajustado para operar com FP 0,85 adiantado, qual será a corrente na linha de transmissão nesse sistema?
- Assuma que as perdas na linha de transmissão são dadas por

$$P_{\text{PL}} = 3I_L^2 R_L \quad \text{perdas na linha}$$

em que o índice PL significa perdas na linha. De que forma as perdas na linha comparam-se nos dois casos?

### Solução

- No primeiro caso, a potência ativa da carga 1 é 100 kW e sua potência reativa é

$$\begin{aligned} Q_1 &= P_1 \operatorname{tg} \theta \\ &= (100 \text{ kW}) \operatorname{tg} (\arccos 0,78) = (100 \text{ kW}) \operatorname{tg} 38,7^\circ \\ &= 80,2 \text{ kvar} \end{aligned}$$

A potência ativa da carga 2 é 200 kW e sua potência reativa é

$$\begin{aligned} Q_2 &= P_2 \operatorname{tg} \theta \\ &= (200 \text{ kW}) \operatorname{tg} (\arccos 0,80) = (200 \text{ kW}) \operatorname{tg} 36,87^\circ \\ &= 150 \text{ kvar} \end{aligned}$$

A potência ativa da carga 3 é 150 kW e sua potência reativa é

$$\begin{aligned} Q_3 &= P_3 \operatorname{tg} \theta \\ &= (150 \text{ kW}) \operatorname{tg} (\arccos 0,85) = (150 \text{ kW}) \operatorname{tg} 31,8^\circ \\ &= 93 \text{ kvar} \end{aligned}$$

Portanto, a carga ativa total é

$$\begin{aligned} P_{\text{tot}} &= P_1 + P_2 + P_3 \\ &= 100 \text{ kW} + 200 \text{ kW} + 150 \text{ kW} = 450 \text{ kW} \end{aligned}$$

e a carga reativa total é

$$\begin{aligned} Q_{\text{tot}} &= Q_1 + Q_2 + Q_3 \\ &= 80,2 \text{ kvar} + 150 \text{ kvar} + 93 \text{ kvar} = 323,2 \text{ kvar} \end{aligned}$$

O fator de potência equivalente do sistema é, assim,

$$\begin{aligned} \text{FP} &= \cos \theta = \cos \left( \operatorname{arctg} \frac{Q}{P} \right) = \cos \left( \operatorname{arctg} \frac{323,2 \text{ kvar}}{450 \text{ kW}} \right) \\ &= \cos 35,7^\circ = 0,812 \text{ atrasado} \end{aligned}$$

Finalmente, a corrente de linha é dada por

$$I_L = \frac{P_{\text{tot}}}{\sqrt{3} V_L \cos \theta} = \frac{450 \text{ kW}}{\sqrt{3}(480 \text{ V})(0,812)} = 667 \text{ A}$$

- (b) As potências ativas e reativas das cargas 1 e 2 não se alteram, assim como a potência ativa da carga 3. A potência reativa da carga 3 é

$$\begin{aligned} Q_3 &= P_3 \operatorname{tg} \theta \\ &= (150 \text{ kW}) \operatorname{tg} (-\arccos 0,85) = (150 \text{ kW}) \operatorname{tg} (-31,8^\circ) \\ &= -93 \text{ kvar} \end{aligned}$$

Portanto, a carga ativa total é

$$\begin{aligned} P_{\text{tot}} &= P_1 + P_2 + P_3 \\ &= 100 \text{ kW} + 200 \text{ kW} + 150 \text{ kW} = 450 \text{ kW} \end{aligned}$$

e a carga reativa total é

$$\begin{aligned} Q_{\text{tot}} &= Q_1 + Q_2 + Q_3 \\ &= 80,2 \text{ kvar} + 150 \text{ kvar} - 93 \text{ kvar} = 137,2 \text{ kvar} \end{aligned}$$

O fator de potência equivalente do sistema é, assim,

$$\begin{aligned} \text{FP} &= \cos \theta = \cos \left( \operatorname{arctg} \frac{Q}{P} \right) = \cos \left( \operatorname{arctg} \frac{137,2 \text{ kvar}}{450 \text{ kW}} \right) \\ &= \cos 16,96^\circ = 0,957 \text{ atrasado} \end{aligned}$$

Finalmente, a corrente de linha é dada por

$$I_L = \frac{P_{\text{tot}}}{\sqrt{3}V_L \cos \theta} = \frac{450 \text{ kW}}{\sqrt{3}(480 \text{ V})(0,957)} = 566 \text{ A}$$

(c) As perdas na linha de transmissão no primeiro caso são

$$P_{\text{PL}} = 3I_L^2 R_L = 3(667 \text{ A})^2 R_L = 1.344.700 R_L$$

As perdas na linha de transmissão no segundo caso são

$$P_{\text{PL}} = 3I_L^2 R_L = 3(566 \text{ A})^2 R_L = 961.070 R_L$$

Observe que, no segundo caso, as perdas na linha de transmissão são 28% menores do que no primeiro, ao passo que a potência fornecida às cargas é a mesma.

Como foi visto no Exemplo 5-3, a capacidade de ajustar o fator de potência de uma ou mais cargas de um sistema de potência pode afetar de forma significativa a eficiência operacional do sistema de potência. Quanto menor o fator de potência de um sistema, maiores serão as perdas nas suas linhas de alimentação de potência. A carga da maioria dos sistemas típicos de potência constitui-se de motores de indução. Assim, os fatores de potência desses sistemas são quase sempre atrasados. Dispor de uma ou mais cargas adiantadas (motores síncronos sobre-excitados) no sistema pode ser útil pelas seguintes razões:

1. Uma carga adiantada pode fornecer alguma potência reativa  $Q$  para as cargas atrasadas vizinhas, em vez de ela vir do gerador. Como a potência reativa não precisa viajar pelas linhas de transmissão, longas e de resistência bastante elevada, a corrente da linha de transmissão é reduzida e as perdas do sistema de potência são muito inferiores. (Isso foi mostrado no exemplo anterior.)
2. Como as linhas de transmissão transportam menos corrente, elas podem ser menores para um dado fluxo de potência nominal. Uma corrente nominal inferior reduz significativamente o custo de um sistema de potência.
3. Além disso, a necessidade de operar um motor síncrono com um fator de potência adiantado significa que o motor deverá funcionar *sobre-excitado*. Esse modo de operação aumenta o conjugado máximo do motor, reduzindo assim a possibilidade do valor máximo ser acidentalmente excedido.

O uso de motores síncronos ou outros equipamentos para aumentar o fator de potência geral de um sistema de potência é denominado *correção do fator de potência*. Como um motor síncrono pode propiciar correção do fator de potência e também custos menores para o sistema de potência, muitas cargas que aceitam um motor de velocidade constante (mesmo que elas não *precisem* necessariamente de velocidade constante) são acionadas por motores síncronos. Um motor síncrono pode custar mais do que um motor de indução. Ainda assim, a possibilidade de operar um motor síncrono com o fator de potência adiantado para realizar correção do fator de potência, representa uma economia de custos nas plantas industriais. Isso resulta na compra e utilização de motores síncronos.

É de se esperar que qualquer motor síncrono presente em uma planta industrial opere sobre-excitado, com a finalidade de realizar correção do fator de potência e

aumentar seu conjugado máximo. Entretanto, o funcionamento de um motor síncrono sobre-excitado requer corrente de campo e fluxo elevados, o que causa aquecimento significativo do rotor. Um operador deve ser cuidadoso para não sobre aquecer os enrolamentos de campo ultrapassando a corrente de campo nominal.

### O capacitor síncrono ou condensador síncrono

Um motor síncrono, adquirido para acionar uma carga, pode ser operado sobre-excitado, com a finalidade de fornecer potência reativa  $Q$  para um sistema de potência. De fato, antigamente comprava-se um motor síncrono para funcionar sem carga, *simplesmente para realizar correção do fator de potência*. O diagrama fasorial de um motor síncrono, funcionando sobre-excitado a vazio, está mostrado na Figura 5-14.

Como não há potência sendo retirada do motor, os comprimentos proporcionais à potência ( $E_A \sin \delta$  e  $I_A \cos \theta$ ) são nulos. Como a equação da lei das tensões de Kirchhoff para um motor síncrono é

$$\mathbf{V}_\phi = \mathbf{E}_A = jX_S \mathbf{I}_A, \tag{5-1}$$

o termo  $jX_S \mathbf{I}_A$  apontará para a esquerda e, portanto, a corrente de armadura  $\mathbf{I}_A$  apontará para cima. Se  $\mathbf{V}_\phi$  e  $\mathbf{I}_A$  forem examinados, a relação de tensão e corrente entre eles será como a de um capacitor. Do ponto de vista do sistema de potência, um motor síncrono a vazio sobre-excitado assemelha-se exatamente a um grande capacitor.

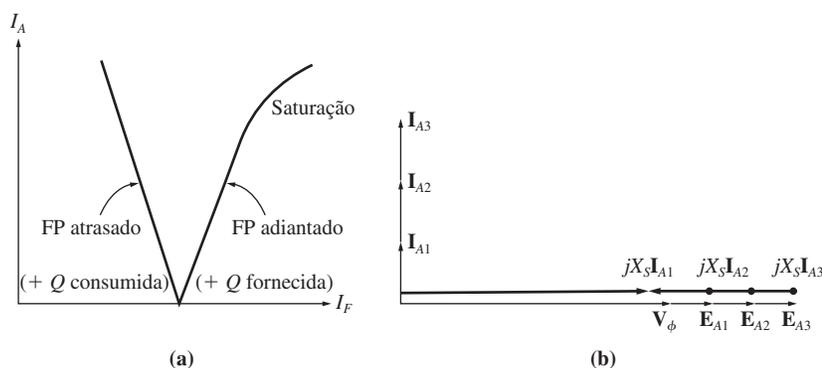
Alguns motores síncronos costumavam ser vendidos especificamente para correção do fator de potência. Essas máquinas tinham eixos que sequer chegavam a sair da carcaça do motor – nenhuma carga podia ser acoplada a eles, mesmo que isso fosse desejado. Esses motores síncronos de propósito especial eram frequentemente denominados *condensadores* ou *capacitores síncronos*. (*Condensador* é um nome antigo para capacitor.)

A curva V de um capacitor síncrono está mostrada na Figura 5-15a. Como a potência ativa fornecida à máquina é zero (exceto pelas perdas), temos que com fator de potência unitário a corrente  $I_A = 0$ . Se a corrente de campo for incrementada acima desse ponto, a corrente de linha (e a potência reativa fornecida pelo motor) aumentará de forma aproximadamente linear até que a saturação seja alcançada. A Figura 5-15b mostra o efeito do aumento da corrente de campo sobre o diagrama fasorial do motor.

Atualmente, os capacitores estáticos convencionais são de custo mais econômico para se comprar e usar do que os capacitores síncronos. Entretanto, alguns capacitores síncronos podem ainda estar em uso em instalações industriais antigas.



**FIGURA 5-14**  
Diagrama fasorial de um *capacitor síncrono* ou condensador síncrono.



**FIGURA 5-15**  
 (a) A curva V de um capacitor síncrono. (b) O respectivo diagrama fasorial da máquina.

### 5.3 PARTIDA DE MOTORES SÍNCRONOS

A Seção 5.2 explicou o comportamento de um motor síncrono em condições de regime permanente. Nela, assumiu-se que o motor inicialmente já estava em rotação na *velocidade síncrona*. O que ainda não foi considerado é a pergunta: como o motor inicialmente chegou à velocidade síncrona?

Para compreender a natureza do problema da partida, consulte a Figura 5-16. Ela mostra um motor síncrono de 60 Hz no instante em que a potência é aplicada a seus enrolamentos de estator. O rotor do motor está parado e, portanto, o campo magnético  $\mathbf{B}_R$  é estacionário. O campo magnético  $\mathbf{B}_S$  do estator está começando a girar dentro do motor na velocidade síncrona.

A Figura 5-16a mostra a máquina no instante  $t = 0$  s, quando  $\mathbf{B}_R$  e  $\mathbf{B}_S$  estão exatamente alinhados. Pela equação do conjugado induzido, ou seja,

$$\tau_{\text{ind}} = k\mathbf{B}_R \times \mathbf{B}_S \tag{3-58}$$

temos que o conjugado induzido no eixo do rotor é zero. A Figura 5-16b mostra a situação no instante  $t = 1/240$  s. Nesse curto intervalo de tempo, o rotor mal se moveu, mas o campo magnético do estator agora aponta para a esquerda. Pela equação do conjugado induzido, o conjugado no eixo do rotor agora é *anti-horário*. A Figura 5-16c mostra a situação no tempo  $t = 1/120$  s. Nesse ponto,  $\mathbf{B}_R$  e  $\mathbf{B}_S$  apontam em sentidos opostos e  $\tau_{\text{ind}}$  novamente é igual a zero. Em  $t = 3/240$  s, o campo magnético do estator aponta para a direita e o conjugado resultante é *horário*.

Finalmente, em  $t = 1/60$  s, o campo magnético do estator está novamente alinhado com o campo magnético do rotor e  $\tau_{\text{ind}} = 0$ . Durante um ciclo elétrico, o conjugado era primeiro anti-horário e em seguida, horário. Desse modo, o conjugado médio durante o ciclo completo é zero. O que acontece com o motor é que ele vibra intensamente a cada ciclo elétrico e finalmente sobreaquece.

Difícilmente será satisfatória essa abordagem para dar partida em motores síncronos – normalmente, os administradores não ficam satisfeitos com funcionários que queimam seus equipamentos de alto custo. Assim, como exatamente *se pode* dar partida a um motor síncrono?

Três abordagens básicas podem ser utilizadas para dar partida segura a um motor síncrono:

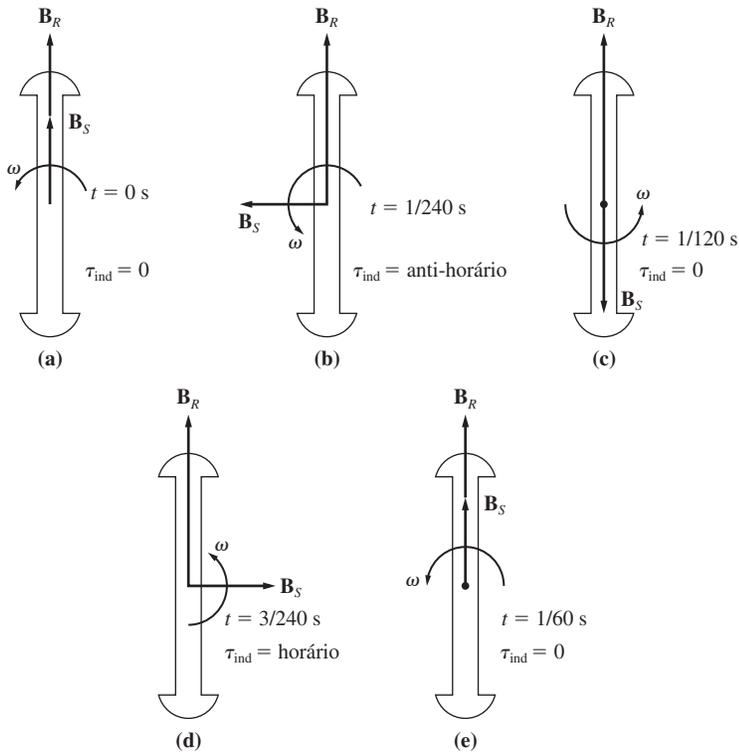


FIGURA 5-16

Problemas de partida em um motor síncrono – o conjugado alterna-se rapidamente em módulo e sentido, de modo que o conjugado líquido de partida é zero.

1. *Reduzir a velocidade do campo magnético do estator* a um valor suficientemente baixo para que o rotor possa acelerar e entrar em sincronismo durante um semiciclo da rotação do campo magnético.
2. *Usar uma máquina motriz externa* para acelerar o motor síncrono até a velocidade síncrona e, em seguida, passar pelo procedimento de entrar em paralelo, conectando a máquina à linha como um gerador. A seguir, ao desativar ou desconectar a máquina motriz, a máquina síncrona torna-se um motor.
3. *Usar enrolamentos amortecedores.* A função dos enrolamentos amortecedores e seu uso na partida de motores serão explicados a seguir.

Todas essas abordagens usadas para dar partida ao motor síncrono serão descritas separadamente.

### Partida do motor pela redução da frequência elétrica

Se o campo magnético do estator de um motor síncrono girar em uma velocidade suficientemente baixa, não haverá problemas para que o rotor acelere e entre em sincronismo com o campo magnético. A velocidade do campo magnético do estator poderá então ser aumentada até a velocidade de funcionamento, aumentando gradualmente  $f_{se}$  até seu valor normal de 50 ou 60 Hz

Essa abordagem para dar partida aos motores síncronos faz muito sentido, mas ela tem um grande problema: de onde vem a frequência elétrica variável? Os sistemas de potência comuns são muito cuidadosamente mantidos em 50 ou 60 Hz, de modo que, até recentemente, qualquer fonte de tensão de frequência variável de ser produzida por um gerador dedicado. Obviamente, essa situação não era prática, exceto em circunstâncias muito incomuns.

Atualmente, as coisas estão diferentes. Os controladores de estado sólido para motor podem ser usados para converter uma frequência constante de entrada em qualquer frequência desejada de saída. Com o desenvolvimento dos modernos pacotes de acionamento (*drive packages*) de frequência variável em estado sólido, tornou-se perfeitamente possível controlar continuamente a frequência elétrica aplicada ao motor, percorrendo todos os valores desde uma fração de hertz até acima da frequência nominal total. Se tal unidade de acionamento de frequência variável estiver incluída em um circuito de controle do motor para se ter controle da velocidade, a partida do motor síncrono torna-se muito fácil – simplesmente ajuste a frequência para um valor muito baixo de partida e, então, eleve-a até a frequência de operação desejada para um funcionamento normal.

Quando um motor síncrono opera em uma velocidade inferior à velocidade nominal, sua tensão gerada interna  $E_A = K\phi\omega$  será menor do que a normal. Se o valor de  $E_A$  for reduzido, então a tensão de terminal aplicada ao motor também deverá ser reduzida para manter a corrente de estator em níveis seguros. A tensão em qualquer acionador ou circuito de partida de frequência variável deve variar de forma aproximadamente linear com a frequência aplicada.

Para aprender mais sobre essas unidades de acionamento de motor em estado sólido, consulte Referência 9.

### Partida do motor com uma máquina motriz externa

O segundo modo de dar partida a um motor síncrono é acoplando-o a um motor de partida externo e levando a máquina síncrona até a velocidade plena com o motor externo. A seguir, a máquina síncrona pode ser colocada em paralelo com o sistema de potência como gerador e o motor de partida pode ser desacoplado do eixo da máquina. Quando o motor de partida é desligado, o eixo da máquina desacelera, o campo magnético do rotor  $\mathbf{B}_R$  fica para trás de  $\mathbf{B}_{iq}$  e a máquina síncrona começa a funcionar como um motor. Uma vez que a entrada em paralelo esteja completa, então o motor síncrono poderá receber carga de forma ordinária.

Esse procedimento não é tão absurdo como pode parecer, porque muitos motores síncronos fazem parte de conjuntos de motor-gerador e pode-se dar partida à máquina síncrona de um conjunto como esse, usando a outra máquina como motor de partida. Além disso, o motor de partida precisa superar apenas a inércia da máquina síncrona a vazio – nenhuma carga é aplicada até que o motor entre em paralelo com o sistema de potência. Como apenas a inércia do motor precisa ser superada, o motor de partida pode ter uma característica nominal *muito* menor do que a do motor síncrono no qual ele está dando a partida.

Como motores síncronos de grande porte têm sistemas de excitação sem escovas montados em seus eixos, frequentemente é possível usar essas excitatrizes como motores de partida.

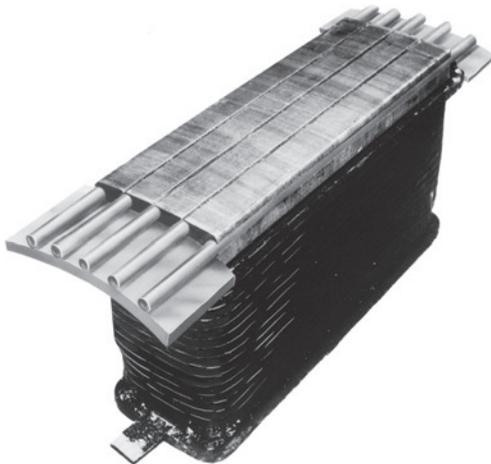
Em muitos motores síncronos, desde médio até grande porte, um motor externo de partida ou o uso da excitatriz podem ser as únicas soluções possíveis, porque os

sistemas de potência aos quais eles estão ligados não são capazes de lidar com as correntes de partida necessárias para que enrolamentos amortecedores possam ser usados, como será descrito na abordagem seguinte.

### Partida do motor usando enrolamentos amortecedores

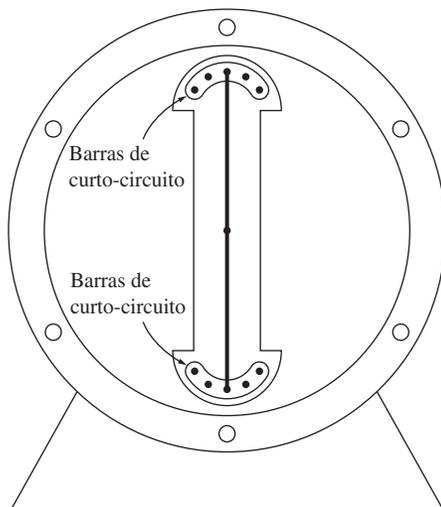
Indubitavelmente, o modo mais popular de dar partida a um motor síncrono é empregando enrolamentos *amortecedores*. Esses enrolamentos são barras especiais colocadas em ranhuras abertas na face do rotor de um motor síncrono e, em seguida, colocadas em curto-circuito em cada extremidade por um grande *anel de curto-circuito*. Uma face polar com um conjunto de enrolamentos amortecedores está mostrada na Figura 5-17 e enrolamentos amortecedores são visíveis nas Figuras 4-2 e 4-4.

Para compreender o que um conjunto de enrolamentos amortecedores faz em um motor síncrono, examine o rotor estilizado de dois polos salientes que é mostrado



**FIGURA 5-17**

Um polo de campo de rotor de uma máquina síncrona, mostrando os enrolamentos amortecedores na face polar. (Cortesia de General Electric Company.)



**FIGURA 5-18**

Um diagrama simplificado de uma máquina de dois polos salientes, mostrando os enrolamentos amortecedores.

na Figura 5-18. Esse rotor mostra um enrolamento amortecedor com as barras de curto-circuito nas extremidades das duas faces polares do rotor conectadas por fios. (Essa não é exatamente a forma normal de se construir máquinas, mas servirá muito bem para ilustrar questão sobre enrolamentos.)

Assuma inicialmente que *o enrolamento do campo principal do rotor está desligado* e que um conjunto trifásico de tensões é aplicado ao estator dessa máquina. Quando a potência é inicialmente aplicada no tempo  $t = 0$  s, assumo que o campo magnético  $\mathbf{B}_S$  é vertical, como mostra a Figura 5-19a. Quando o campo magnético  $\mathbf{B}_S$  gira em sentido anti-horário, ele induz uma tensão nas barras do enrolamento amortecedor que é dada pela Equação (1-45):

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

em que  $\mathbf{v}$  = velocidade da barra *relativa ao campo magnético*

$\mathbf{B}$  = vetor densidade de fluxo magnético

$\mathbf{l}$  = comprimento do condutor no campo magnético

As barras na parte superior do rotor estão girando para a direita *relativamente ao campo magnético*, de modo que o sentido resultante da tensão induzida é para fora da página. De modo similar, na parte inferior das barras, a tensão induzida é para dentro da página. Essas tensões produzem um fluxo de corrente para fora das barras superiores e para dentro das barras inferiores, resultando um campo magnético  $\mathbf{B}_W$  que aponta para a direita. Pela equação do conjugado induzido

$$\tau_{\text{ind}} = k\mathbf{B}_W \times \mathbf{B}_S$$

temos que o conjugado induzido resultante nas barras (e no rotor) é *anti-horário*.

A Figura 5-19b mostra a situação em  $t = 1/240$  s. Aqui, o campo magnético do estator girou  $90^\circ$ , ao passo que o rotor mal se moveu (ele simplesmente não pode ganhar velocidade em um intervalo de tempo tão curto). Nesse ponto, a tensão induzida nos enrolamentos amortecedores é zero, porque  $\mathbf{v}$  é paralelo a  $\mathbf{B}$ . Sem tensão induzida, não há corrente nos enrolamentos e o conjugado induzido é zero.

A Figura 5-19c mostra a situação em  $t = 1/120$  s. Agora, o campo magnético do estator girou  $90^\circ$  e o rotor ainda não se moveu. A tensão induzida [dada pela Equação (1-45)] nos enrolamentos amortecedores é para fora da página nas barras inferiores e para dentro nas barras superiores. O fluxo de corrente resultante é para fora da página nas barras inferiores e para dentro nas barras superiores, fazendo com que o campo magnético  $\mathbf{B}_W$  aponte para a esquerda. O conjugado induzido resultante, dado por

$$\tau_{\text{ind}} = k\mathbf{B}_W \times \mathbf{B}_S$$

tem sentido anti-horário.

Finalmente, a Figura 5-19d mostra a situação em  $t = 3/240$  s. Aqui, como em  $t = 1/240$  s, o conjugado induzido é zero.

Observe que algumas vezes o conjugado é anti-horário e algumas vezes é basicamente zero, mas aponta *sempre no mesmo sentido*. Como um conjugado líquido está atuando em um sentido único, o rotor do motor ganha velocidade. (Isso é inteiramente diferente de dar partida a um motor síncrono usando sua corrente de campo normal, porque nesse caso o conjugado é primeiro horário e em seguida anti-horário, com um valor médio igual a zero. No caso que está sendo discutido

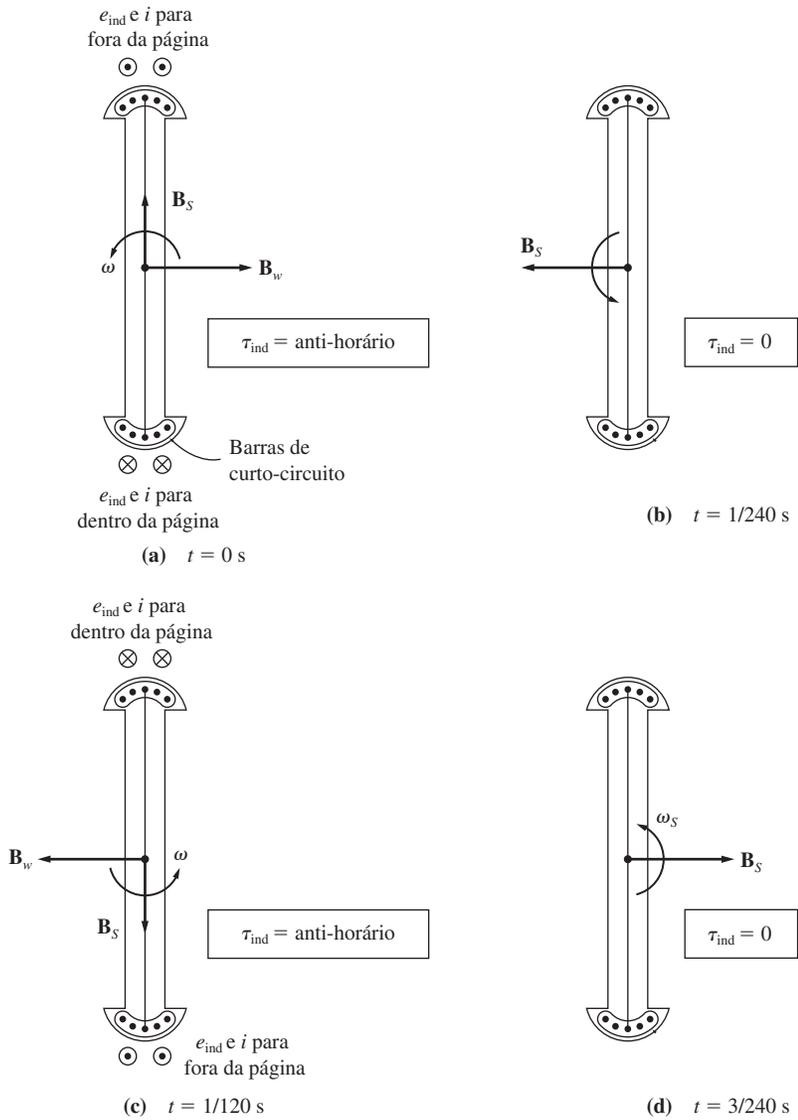


FIGURA 5-19

O desenvolvimento de um conjugado unidirecional com os enrolamentos amortecedores de um motor síncrono.

aqui, o conjugado *sempre* tem o mesmo sentido, de modo que o conjugado médio é diferente de zero.)

Embora o rotor do motor ganhe velocidade, ele nunca poderá alcançar totalmente a velocidade síncrona. Isso é fácil de entender: suponha que um motor esteja girando na velocidade síncrona. Então, a velocidade do campo magnético  $B_S$  do estator será a mesma velocidade do rotor e não haverá *movimento relativo* entre  $B_S$  e o rotor. Se não houver movimento relativo, a tensão induzida nos enrolamentos será zero,

o fluxo de corrente resultante será zero e o campo magnético do enrolamento será zero. Portanto, não haverá conjugado no rotor para mantê-lo girando. Mesmo que o rotor não possa ganhar completamente velocidade até atingir a velocidade síncrona, ele pode chegar próximo. Ele poderá chegar suficientemente próximo de  $n_{\text{sinc}}$  para que a corrente de campo regular possa ser ligada e o rotor entrará em sincronismo com os campos magnéticos do estator.

Em uma máquina real, os circuitos dos enrolamentos de campo não são abertos durante o procedimento de partida. Se esses circuitos fossem abertos, tensões muito elevadas seriam produzidas neles durante a partida. Se os enrolamentos de campo forem colocados em curto-circuito durante a partida, tensões perigosas não serão produzidas e, na realidade, a corrente de campo induzida contribuirá com um conjugado adicional à partida do motor.

Em resumo, se uma máquina tiver enrolamentos amortecedores, será possível dar partida nela executando o procedimento seguinte:

1. Desligue os enrolamentos de campo de sua fonte de potência CC e coloque-os em curto-circuito.
2. Aplique uma tensão trifásica ao estator do motor e deixe o rotor acelerar até próximo da velocidade síncrona. Nenhuma carga deverá estar sendo aplicada ao eixo do motor, para que sua velocidade possa se aproximar de  $n_{\text{sinc}}$  tão próximo quanto possível.
3. Ligue o circuito de campo CC à sua fonte de potência. Após fazer isso, o motor atingirá a velocidade síncrona e, então, cargas poderão ser aplicadas ao seu eixo.

### Efeito dos enrolamentos amortecedores sobre a estabilidade do motor

Se, para dar partida, enrolamentos amortecedores forem acrescentados a uma máquina síncrona, então ganharemos um bônus grátis – aumento da estabilidade da máquina. O campo magnético do estator gira a uma velocidade constante  $n_{\text{sinc}}$ , que se altera somente quando a frequência do sistema varia. Se o rotor girar na velocidade  $n_{\text{sinc}}$ , os enrolamentos amortecedores não terão nenhuma tensão induzida. Se o rotor girar *mais devagar* do que  $n_{\text{sinc}}$ , então haverá movimento relativo entre o rotor e o campo magnético do estator e uma tensão será induzida nos enrolamentos. Essa tensão produz um fluxo de corrente, o qual produz um campo magnético. A interação dos dois campos magnéticos produz um conjugado que tende a aumentar a velocidade da máquina novamente. Por outro lado, se o rotor girar *mais rapidamente* do que o campo magnético do estator, então um será produzido conjugado que tentará reduzir a velocidade do rotor. Assim, *o conjugado produzido pelos enrolamentos amortecedores acelera as máquinas lentas e desacelera as máquinas velozes.*

Portanto, esses enrolamentos tendem a amortecer a carga e outros transitórios da máquina. Por essa razão, esses enrolamentos são denominados *enrolamentos amortecedores*. Tais enrolamentos também são usados em geradores síncronos que operam em paralelo com outros geradores de barramento infinito. Nesse caso, os enrolamentos são utilizados em uma função similar de estabilização. Caso ocorra uma variação de conjugado no eixo do gerador, seu rotor momentaneamente acelerará ou desacelerará e essas mudanças sofrerão oposição pelos enrolamentos amortecedores.

Esses enrolamentos melhoram a estabilidade total dos sistemas de potência pela redução dos transitórios de potência e conjugado.

Os enrolamentos amortecedores são responsáveis pela maioria da corrente subtransitória de uma máquina síncrona em condição de falta elétrica. Um curto-circuito nos terminais de um gerador é simplesmente uma outra forma de transitório e os enrolamentos amortecedores reagem muito rapidamente a ele.

### 5.4 GERADORES SÍNCRONOS E MOTORES SÍNCRONOS

Um gerador síncrono é uma máquina síncrona que converte potência mecânica em potência elétrica, ao passo que um motor síncrono é uma máquina síncrona que converte potência elétrica em potência mecânica. De fato, ambos são fisicamente a mesma máquina.

Uma máquina síncrona pode fornecer ou consumir potência ativa de um sistema de potência e também pode fornecer ou consumir potência reativa desse sistema. As quatro combinações de fluxos de potências ativa e reativa são possíveis e a Figura 5-20 mostra os diagramas fasoriais desses casos.

	Fornecendo potência reativa $Q$ $E_A \cos \delta > V_\phi$	Consumindo potência reativa $Q$ $E_A \cos \delta < V_\phi$
Fornecendo potência $P$  Gerador  $E_A$ adiantada  $V_\phi$		
Consumindo potência $P$  Motor  $E_A$ atrasada  $V_\phi$		

**FIGURA 5-20** Diagramas fasoriais mostrando a geração e o consumo de potência ativa  $P$  e potência reativa  $Q$  por geradores e motores síncronos.

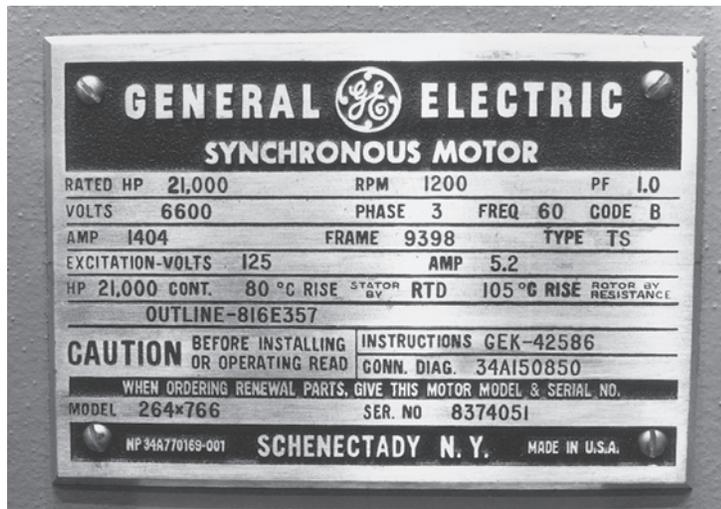


FIGURA 5-21

Placa de identificação típica de um motor síncrono de grande porte. (Cortesia de General Electric Company.)

Observe na figura que

1. A característica peculiar de um gerador síncrono (fornecendo  $P$ ) é que  $E_A$  está à frente de  $V_\phi$ , ao passo que  $E_A$  está atrás de  $V_\phi$  em um motor.
2. A característica peculiar de uma máquina que está fornecendo potência reativa  $Q$  é que  $E_A \cos \delta > V_\phi$ , independentemente de a máquina estar atuando como gerador ou como motor. Uma máquina que está consumindo potência reativa  $Q$  tem  $E_A \cos \delta < V_\phi$ .

## 5.5 ESPECIFICAÇÕES NOMINAIS DO MOTOR SÍNCRONO

Como fisicamente os motores síncronos são as mesmas máquinas que os geradores síncronos, as especificações nominais básicas são as mesmas. Uma diferença importante é que uma  $E_A$  elevada dá um fator de potência *adiantado* em vez de atrasado e, portanto, o efeito do limite máximo de corrente de campo é expresso como uma especificação nominal com um fator de potência *adiantado*. Além disso, como a saída de um motor síncrono é potência mecânica, a especificação nominal de potência de um motor é dada usualmente em *horsepower* (HP) de saída (nos Estados Unidos) ou em quilowatts (kW) de saída (nas demais regiões do mundo), em vez de ser especificada por um valor nominal em volts-ampères e fator de potência como é feito para os geradores.

A placa de identificação de um motor síncrono de grande porte está mostrada na Figura 5-21. Além da informação mostrada na figura, um motor síncrono de menor porte teria também fator de serviço em sua placa.

Em geral, os motores síncronos são mais adaptados a aplicações de baixa velocidade e alta potência do que os motores de indução (veja o Capítulo 6). Portanto, eles são comumente usados com cargas de velocidade baixa e potência elevada.

## 5.6 SÍNTESE DO CAPÍTULO

Um motor síncrono é fisicamente a mesma máquina que um gerador síncrono, exceto que o sentido do fluxo de potência ativa é invertido. Como os motores síncronos são usualmente conectados a sistemas de potência que contêm geradores de porte muito maior do que os motores, a frequência e a tensão de terminal de um motor síncrono são fixas (isto é, o sistema de potência aparece como um barramento infinito ao motor).

O circuito equivalente de um motor síncrono é o mesmo de um gerador síncrono, exceto pelo fato de que o sentido da corrente de armadura é invertido.

A velocidade de um motor síncrono é constante desde a carga a vazio até a carga máxima possível do motor. A velocidade de rotação é

$$n_m = \frac{120 f_{se}}{P} \quad (5-3)$$

desde a vazio até a carga máxima possível. A potência máxima possível que um gerador síncrono pode produzir é

$$P_{\max} = \frac{3V_\phi E_A}{X_S} \quad (4-21)$$

e o conjugado máximo possível é dado por

$$\tau_{\max} = \frac{3V_\phi E_A}{\omega X_S} \quad (4-22)$$

Se esse valor for excedido, o rotor não conseguirá se manter em sincronismo com os campos magnéticos do estator e dizemos que os polos do motor irão *escorregar*.

Se ignorarmos o efeito das perdas elétricas e mecânicas, a potência convertida da forma elétrica para a mecânica no motor será dada por

$$P_{\text{conv}} = \frac{3V_\phi E_A}{X_S} \text{sen } \delta \quad (4-20)$$

Se a tensão de entrada  $V_\phi$  for constante, a potência convertida (e assim a potência fornecida) será diretamente proporcional a  $E_A \text{sen } \delta$ . Essa relação pode ser útil quando os diagramas fasoriais do motor síncrono são desenhados. Por exemplo, se a corrente de campo for aumentada ou diminuída, a tensão gerada interna do motor aumentará ou diminuirá, mas o valor de  $E_A \text{sen } \delta$  permanecerá constante. Essa condição facilita a marcação das mudanças no diagrama fasorial do motor (veja a Figura 5-9) e o cálculo das curvas V do motor síncrono.

Se a corrente de campo de um motor síncrono for alterada, enquanto sua carga no eixo permanece constante, então a potência reativa fornecida ou consumida pelo motor mudará. Se  $E_A \cos \delta > V_\phi$ , o motor fornecerá potência reativa, ao passo que, se  $E_A \cos \delta < V_\phi$ , o motor consumirá potência reativa. Usualmente, um motor síncrono funciona com  $E_A \cos \delta > V_\phi$ , de modo que o motor síncrono fornece potência reativa ao sistema de potência e reduz o fator de potência total das cargas.

Um motor síncrono não tem conjugado líquido de partida e, portanto, não pode arrancar por si próprio. Há três modos principais de dar partida a um motor síncrono:

1. Reduzir a frequência do estator a um valor seguro de partida.

2. Usar uma máquina motriz externa.
3. Colocar enrolamentos amortecedores no motor para acelerá-lo até próximo da velocidade síncrona antes que uma corrente contínua seja aplicada aos enrolamentos de campo.

Se enrolamentos amortecedores estiverem presentes em um motor, eles aumentarão também a estabilidade do motor durante os transitórios de carga.

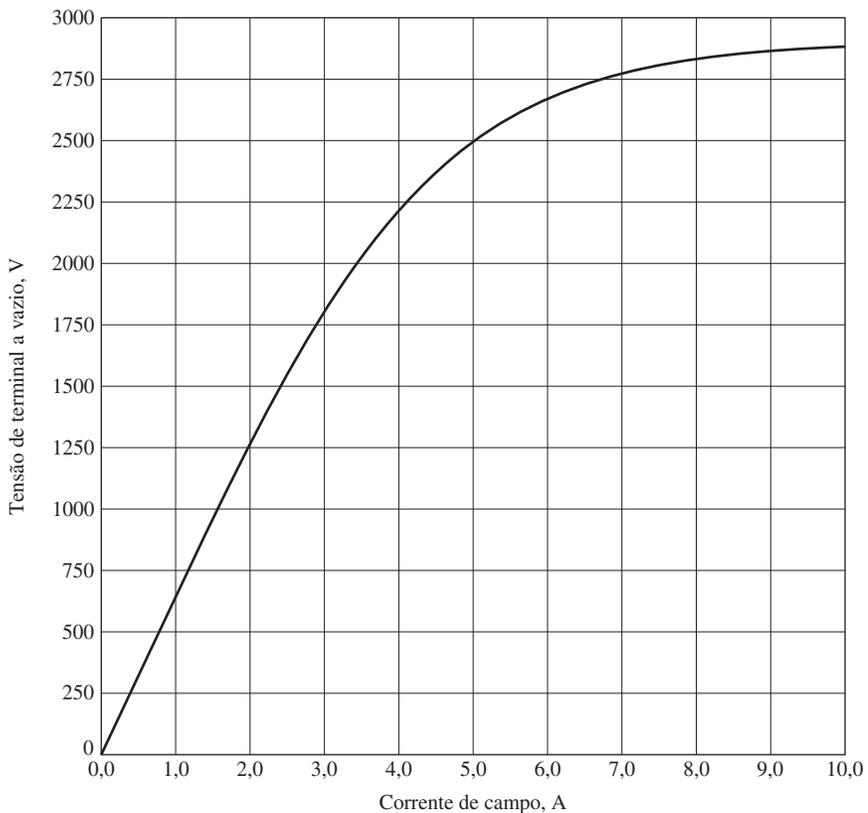
## PERGUNTAS

- 5.1 Qual é a diferença entre um motor síncrono e um gerador síncrono?
- 5.2 O que é a regulação de velocidade de um motor síncrono?
- 5.3 Quando se usaria um motor síncrono mesmo que sua característica de ter velocidade constante não fosse necessária?
- 5.4 Por que um motor síncrono não consegue dar partida a si mesmo?
- 5.5 Que técnicas estão disponíveis para dar partida a um motor síncrono?
- 5.6 O que são enrolamentos amortecedores? Por que o conjugado produzido por eles é unidirecional na partida, ao passo que o conjugado produzido pelo enrolamento de campo principal alterna seu sentido?
- 5.7 O que é um capacitor síncrono? Para que se poderia usar um deles?
- 5.8 Explique, usando diagramas fasoriais, o que acontece a um motor síncrono quando sua corrente de campo é variada. Obtenha uma curva V de motor síncrono a partir do diagrama fasorial.
- 5.9 O circuito de campo de um motor síncrono está em situação de maior risco de sobreaquecimento quando ele opera com fator de potência adiantado ou atrasado? Explique, usando diagramas fasoriais.
- 5.10 Um motor síncrono está funcionando com uma carga ativa fixa e sua corrente de campo é aumentada. Se a corrente de armadura cair, o motor estava inicialmente operando com fator de potência atrasado ou adiantado?
- 5.11 Por que a tensão aplicada a um motor síncrono deve ter seu valor nominal reduzido quando ele operar em frequências menores do que a frequência nominal?

## PROBLEMAS

- 5.1 Um motor síncrono de 480 V, 60 Hz, 400 HP, FP 0,8 adiantado, oito polos e ligado em  $\Delta$  tem uma reatância síncrona de  $0,6 \Omega$  e uma resistência de armadura desprezível. Para os objetivos deste problema, ignore as perdas por atrito, por ventilação e no núcleo. Assuma que  $|\mathbf{E}_A|$  é diretamente proporcional à corrente de campo  $I_F$  (em outras palavras, assumo que o motor opera na parte linear da curva de magnetização) e que  $|\mathbf{E}_A| = 480$  V, quando  $I_F = 4$  A.
  - (a) Qual é a velocidade desse motor?
  - (b) Se este motor estiver fornecendo inicialmente 400 HP, com FP 0,8 atrasado, quais serão os módulos e ângulos de  $\mathbf{E}_A$  e  $\mathbf{I}_A$ ?
  - (c) Quanto conjugado o motor está produzindo? Qual é o ângulo de conjugado  $\delta$ ? Quão próximo está esse valor do conjugado induzido máximo possível do motor para esse valor de corrente de campo?
  - (d) Se  $|\mathbf{E}_A|$  for aumentado em 30%, qual será a nova corrente de armadura? Qual será o novo fator de potência do motor?
  - (e) Calcule e plote a curva V do motor para essa condição de carga.

- 5.2** Assuma que o motor do Problema 5-1 está operando nas condições nominais.
- Quais são os módulos e ângulos de  $\mathbf{E}_A$ ,  $\mathbf{I}_A$ ? Qual é o valor de  $I_F$ ?
  - Suponha que a carga seja removida do motor. Quais serão agora as magnitudes e ângulos de  $\mathbf{E}_A$  e  $\mathbf{I}_A$ ?
- 5.3** Um motor síncrono de 230 V, 50 Hz e dois polos, usa 40 A da linha, com fator de potência unitário e plena carga. Assumindo que o motor não tenha perdas, respostas às seguintes perguntas:
- Qual é o conjugado de saída do motor? Expresse a resposta em newtons-metros e em libras-pés.
  - Que deverá ser feito para mudar o fator de potência para 0,85 adiantado? Explique sua resposta, usando diagramas fasoriais.
  - Qual será o valor da corrente de linha se o fator de potência for ajustado para 0,85 adiantado?
- 5.4** Um motor síncrono de 2300 V, 1000 HP, 60 Hz, dois polos, com FP 0,8 adiantado e ligado em Y tem uma reatância síncrona de  $2,5 \Omega$  e uma resistência de armadura de  $0,3 \Omega$ . Em 60 Hz, as perdas por atrito e ventilação são 30 kW e as perdas no núcleo são 20 kW. O circuito de campo tem uma tensão CC de 200 V e a corrente  $I_F$  máxima é 10 A. A característica a vazio desse motor está mostrada na Figura P5-1. Responda às seguintes perguntas sobre o motor, assumindo que ele está sendo alimentado por um barramento infinito.



**FIGURA P5-1**  
Característica a vazio para o motor dos Problemas 5-4 e 5-5.

- (a) Quanta corrente de campo será necessária se esta máquina estiver operando com fator de potência unitário a plena carga?
- (b) Qual é a eficiência do motor a plena carga e o fator de potência unitário?
- (c) Se a corrente de campo for aumentada em 5%, qual será o novo valor da corrente de armadura? Qual será o novo fator de potência? Quanta potência reativa está sendo consumida ou fornecida pelo motor?
- (d) Teoricamente, qual é o conjugado máximo que esta máquina é capaz de fornecer com fator de potência unitário? É com FP 0,8 adiantado?
- 5.5** Plote as curvas  $V$  ( $I_A$  versus  $I_F$ ) para o motor síncrono do Problema 5-4, a vazio, meia carga e plena carga. (Observação: uma versão eletrônica da característica a vazio da Figura P5-1 está disponível no *site* do livro. Assim, os cálculos exigidos por esse problema poderão ser simplificados.)
- 5.6** Se um motor síncrono de 60 Hz operar em 50 Hz, sua reatância síncrona será a mesma de 60 Hz, ou será diferente? (*Sugestão*: Lembre-se da dedução de  $X_s$ .)
- 5.7** Um motor síncrono de 208 V, com fator de potência unitário e ligado em Y, consome 50 A de um sistema de potência de 208 V. Nessas condições, a corrente de campo que está circulando é 2,7 A. Sua reatância síncrona é 1,6  $\Omega$ . Assuma que a característica a vazio é linear.
- (a) Encontre  $V_\phi$  e  $E_A$  nessas condições.
- (b) Encontre o ângulo de conjugado  $\delta$ .
- (c) Qual é o limite de potência de estabilidade estática nessas condições?
- (d) Quanta corrente de campo seria necessária para que o motor operasse com fator de potência 0,80 adiantado?
- (e) Qual é o novo ângulo de conjugado da parte (d)?
- 5.8** Um motor síncrono trifásico de 4,12 kV, 60 Hz, 3000 HP, FP 0,8 adiantado e ligado em  $\Delta$  tem uma reatância síncrona de 1,1 por unidade e uma resistência de armadura de 0,1 por unidade. Se este motor estiver funcionando na tensão nominal, com uma corrente de linha de 300 A e FP 0,85 adiantado, qual será a tensão gerada interna por fase dentro deste motor? Qual será o ângulo de conjugado  $\delta$ ?
- 5.9** A Figura P5-2 mostra o diagrama fasorial de um motor síncrono para o motor que está operando com um fator de potência adiantado sem *REATÂNCIA*. Neste motor, o ângulo de conjugado é dado por

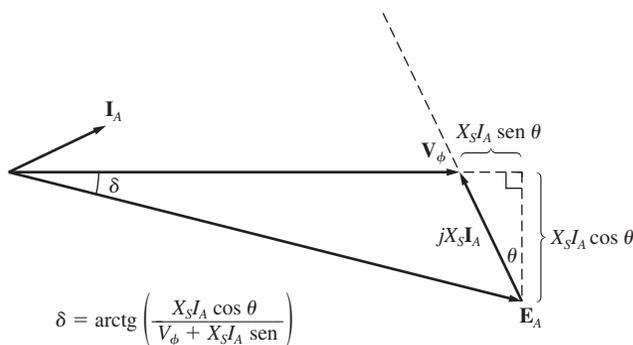


FIGURA P5-2

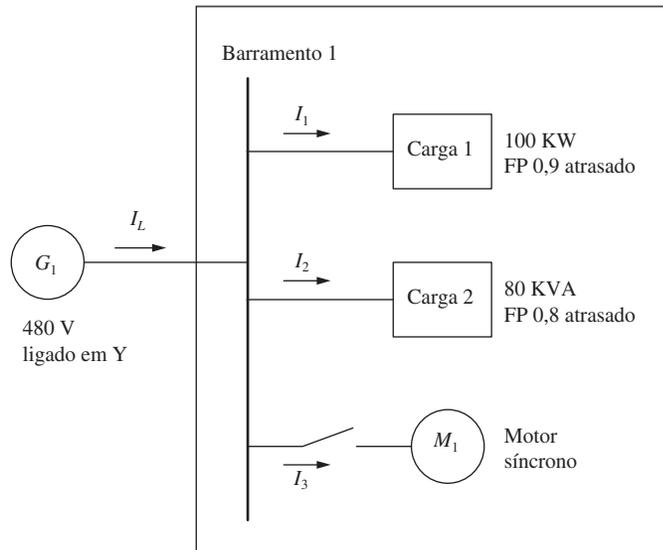
Diagrama fasorial de um motor com fator de potência adiantado.

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{X_S I_A \cos \theta}{V_\phi + X_S I_A \operatorname{sen} \theta}$$

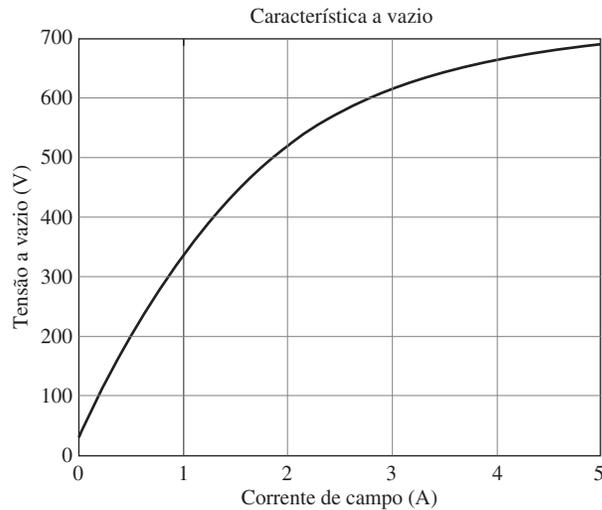
$$\delta = \operatorname{arctg} \left( \frac{X_S I_A \cos \theta}{V_\phi + X_S I_A \operatorname{sen} \theta} \right)$$

Deduz a equação para o ângulo de conjugado do motor síncrono *se a resistência de armadura for incluída*.

- 5.10** Uma máquina síncrona tem uma reatância síncrona de  $1,0 \Omega$  por fase e uma resistência de armadura de  $1,0 \Omega$  por fase. Se  $\mathbf{E}_A = 460 \angle -10^\circ \text{ V}$  e  $\mathbf{V}_\phi = 480 \angle 0^\circ \text{ V}$ , essa máquina será um motor ou um gerador? Quanta potência  $P$  máquina está consumindo ou fornecendo ao sistema elétrico? Quanta potência reativa  $Q$  ela está consumindo ou fornecendo ao sistema elétrico?
- 5.11** Um motor síncrono de 500 kVA, 600 V, FP 0,8 adiantado, ligado em Y tem uma reatância síncrona de 1,0 por unidade e uma resistência de armadura de 0,1 por unidade. Nesse momento, temos  $\mathbf{E}_A = 1,00 \angle 12^\circ \text{ pu}$  e  $\mathbf{V}_\phi = 1 \angle 0^\circ \text{ pu}$ .
- Nesse momento, a máquina está operando como motor ou como gerador?
  - Quanta potência  $P$  a máquina está consumindo ou fornecendo ao sistema elétrico?
  - Quanta potência reativa  $Q$  ela está consumindo ou fornecendo ao sistema elétrico?
  - A máquina está funcionando dentro de seus limites nominais?
- 5.12** A Figura P5-3 mostra uma pequena planta industrial alimentada por uma fonte de potência trifásica de 480 V. A planta contém três cargas principais, como está mostrado na figura. Responda às seguintes perguntas sobre a planta. O motor síncrono tem especificações nominais de 100 HP, 460 V e FP 0,8 adiantado. A reatância síncrona é 1,1 pu e a resistência de armadura é 0,01 pu. A VAZ deste motor é mostrada na Figura P5-4.



**FIGURA P5-3**  
Uma pequena planta industrial.

**FIGURA P5-4**

Característica a vazio de um motor síncrono.

- (a) Se a chave do motor síncrono for aberta, quanta potência ativa, reativa e aparente serão fornecidas à planta? Qual será a corrente  $I_L$  na linha de transmissão?

Agora, a chave é fechada e o motor síncrono passa a fornecer potência nominal, com fator de potência nominal.

- (b) Qual é a corrente de campo do motor?  
 (c) Qual é o ângulo de conjugado do motor?  
 (d) Quanta potência ativa, reativa e aparente estão sendo fornecidas agora à planta? Qual é a corrente  $I_L$  na linha de transmissão?

Agora, suponha que a corrente de campo seja aumentada para 2,0 A.

- (e) Quanta potência ativa e reativa estão sendo fornecidas ao motor?  
 (f) Qual é o ângulo de conjugado do motor?  
 (g) Qual é o fator de potência do motor?  
 (h) Quanta potência ativa, reativa e aparente estão sendo fornecidas agora à planta? Qual é a corrente  $I_L$  na linha de transmissão?  
 (i) Como a corrente de linha da parte (d) pode ser comparada com a corrente de linha da parte (h)? Por quê?

**5.13** Um motor síncrono de 480 V, 100 kW, FP 0,8 adiantado, 50 Hz, quatro polos e ligado em Y tem uma reatância síncrona de  $1,8 \Omega$  e uma resistência de armadura desprezível. As perdas rotacionais também devem ser ignoradas. Esse motor deve operar dentro de uma faixa contínua de velocidades de 300 a 1500 rpm, em que as alterações de velocidade são obtidas controlando a frequência do sistema por meio de um regulador de estado sólido.

- (a) Dentro de que intervalo a frequência de entrada deve variar para possibilitar essa faixa de controle de velocidade?  
 (b) Qual é o valor de  $E_A$  nas condições nominais do motor?  
 (c) Com a  $E_A$  calculada na parte (b), qual é a potência máxima que o motor pode produzir na velocidade nominal?  
 (d) Qual é o maior valor que  $E_A$  poderia ter em 300 rpm?

- (e) Assumindo que a tensão aplicada  $V_\phi$  tem seu valor nominal reduzido na mesma proporção que  $E_A$ , qual é potência máxima que o motor pode fornecer em 300 rpm?
- (f) Como a capacidade de potência de um motor síncrono relaciona-se com sua velocidade?
- 5.14** Um motor síncrono de 2300 V, 400 HP, 60 Hz, oito polos e ligado em Y tem um fator de potência nominal de 0,85 adiantado. A plena carga, a eficiência é 90%. A resistência de armadura é  $0,8 \Omega$  e a reatância síncrona é  $11 \Omega$ . Encontre valores para as seguintes grandezas dessa máquina, quando ela está operando a plena carga:
- Conjugado de saída
  - Potência de entrada
  - $n_m$
  - $E_A$
  - $|I_A|$
  - $P_{\text{conv}}$  (potência convertida)
  - $P_{\text{perdas mec}} + P_{\text{perdas núcleo}} + P_{\text{perdas supl}}$ .
- 5.15** O motor síncrono ligado em Y, cuja placa de identificação está mostrada na Figura 5-21, tem uma reatância síncrona por unidade de 0,70 e uma resistência por unidade de 0,02.
- Qual é a potência de entrada nominal desse motor?
  - Qual é o módulo de  $E_A$  nas condições nominais?
  - Se a potência de entrada do motor for 12 MW, qual será a potência reativa máxima que o motor poderá fornecer simultaneamente? É a corrente de armadura ou a corrente de campo que limita a saída de potência reativa?
  - Quanta potência o circuito de campo consome nas condições nominais?
  - Qual é a eficiência desse motor a plena carga?
  - Qual é o conjugado de saída do motor nas condições nominais? Expresse sua resposta em newtons-metros e em libras-pés.
- 5.16** Um gerador síncrono de 480 V, 500 kVA, FP 0,8 atrasado e ligado em Y tem uma reatância síncrona de  $0,4 \Omega$  e uma resistência de armadura desprezível. Esse gerador está fornecendo potência para um motor síncrono de 480 V, 80 kW, FP 0,8 adiantado e ligado em Y, com uma reatância síncrona de  $2,0 \Omega$  e uma resistência de armadura desprezível. O gerador síncrono é ajustado para ter uma tensão de terminal de 480 V quando o motor estiver consumindo a potência nominal com fator de potência unitário.
- Calcule os módulos e os ângulos de  $E_A$  para ambas as máquinas.
  - Se o fluxo no motor for aumentado em 10%, que acontecerá à tensão de terminal do sistema de potência? Qual será o novo valor?
  - Qual será o fator de potência do motor após o aumento de fluxo do motor?
- 5.17** Um motor síncrono de 440 V, 60 Hz, trifásico, ligado em Y tem uma reatância síncrona de  $1,5 \Omega$  por fase. A corrente de campo foi ajustada de modo que o ângulo de conjugado  $\delta$  é  $25^\circ$  quando a potência fornecida pelo gerador é 80 kW.
- Qual é o módulo da tensão gerada interna  $E_A$  dessa máquina?
  - Quais são o módulo e o ângulo da corrente de armadura da máquina? Qual é o fator de potência do motor?
  - Se a corrente de campo permanecer constante, qual será a potência máxima absoluta que esse motor poderá fornecer?
- 5.18** Um motor síncrono de 460 V, 200 kVA, FP 0,85 adiantado, 400 Hz, quatro polos, ligado em Y tem uma resistência de armadura desprezível e uma reatância síncrona de 0,90 por unidade. Ignore todas as perdas.
- Qual é a velocidade de rotação desse motor?

- (b) Qual é o conjugado de saída do motor nas condições nominais?
- (c) Qual é a tensão gerada interna do motor nas condições nominais?
- (d) Com a corrente de campo tendo o mesmo valor presente no motor na parte (c), qual é a saída de potência máxima possível da máquina?
- 5.19** Um motor síncrono de 100 HP, 440 V, FP 0,8 adiantado, ligado em  $\Delta$ , tem uma resistência de armadura de  $0,3 \Omega$  e uma reatância síncrona de  $4,0 \Omega$ . Sua eficiência a plena carga é de 96%.
- (a) Qual é a potência de entrada do motor nas condições nominais?
- (b) Qual é a corrente de linha do motor nas condições nominais? Qual é a corrente de fase do motor nas condições nominais?
- (c) Qual é a potência reativa consumida ou fornecida pelo motor nas condições nominais?
- (d) Qual é a tensão gerada interna  $E_A$  do motor nas condições nominais?
- (e) Quais são as perdas no cobre do estator desse motor nas condições nominais?
- (f) Qual é o valor de  $P_{\text{conv}}$  nas condições nominais?
- (g) Se  $E_A$  for reduzida em 10%, quanta potência reativa será consumida ou fornecida pelo motor?
- 5.20** Responda às seguintes perguntas sobre a máquina do Problema 5-19.
- (a) Se  $E_A = 430 \angle 15^\circ \text{ V}$  e  $\mathbf{V}_\phi = 440 \angle 0^\circ \text{ V}$ , esta máquina estará consumindo ou fornecendo potência ativa ao sistema de potência? Ela estará consumindo ou fornecendo potência reativa ao sistema de potência?
- (b) Calcule a potência ativa  $P$  e a potência reativa  $Q$  fornecidas ou consumidas pela máquina nas condições da parte (a). Nessas circunstâncias, a máquina está dentro de suas especificações nominais?
- (c) Se  $E_A = 470 \angle -20^\circ \text{ V}$  e  $\mathbf{V}_\phi = 440 \angle 0^\circ \text{ V}$ , essa máquina estará consumindo ou fornecendo potência ativa ao sistema de potência? Ela estará consumindo ou fornecendo potência reativa ao sistema de potência?
- (d) Calcule a potência ativa  $P$  e a potência reativa  $Q$  fornecidas ou consumidas pela máquina nas condições da parte (c). Nessas circunstâncias, a máquina está dentro de suas especificações nominais?

## REFERÊNCIAS

1. Chaston, A. N. *Electric Machinery*. Reston, Va.: Reston Publishing, 1986.
2. Del Toro, V. *Electric Machines and Power Systems*. Englewood Cliffs, N.J.: Prentice-Hall, 1985.
3. Fitzgerald, A. E. e C. Kingsley, Jr. *Electric Machinery*. Nova York: McGraw-Hill, 1952.
4. Fitzgerald, A. E., C. Kingsley, Jr. e S. D. Umans: *Electric Machinery*, 6ª ed., Nova York: McGraw-Hill, 2003.
5. Kosow, Irving L. *Control of Electric Motors*. Englewood Cliffs, N.J.: Prentice-Hall, 1972.
6. Liwshitz-Garik, Michael e Clyde Whipple. *Alternating-Current Machinery*. Princeton, N.J.: Van Nostrand, 1961.
7. Nasar, Syed A. (ed.). *Handbook of Electric Machines*. Nova York: McGraw-Hill, 1987.
8. Slemmon, G. R. e A. Straughen. *Electric Machines*. Reading, Mass.: Addison-Wesley, 1980.
9. Vithayathil, Joseph. *Power Electronics: Principles and Applications*. Nova York: McGraw-Hill, 1995.
10. Werninck, E. H. (ed.). *Electric Motor Handbook*. London: McGraw-Hill, 1978.