

Motores monofásicos e para aplicações especiais

OBJETIVOS DE APRENDIZAGEM

- Compreender por que um motor universal é denominado “universal.”
 - Compreender como é possível desenvolver conjugado unidirecional a partir de um campo magnético pulsante em um motor de indução monofásico.
 - Compreender como dar partida nos motores de indução monofásicos.
 - Compreender as características das diversas classes de motores de indução monofásicos: de fase dividida, com capacitores e de polos sombreados.
 - Ser capaz de calcular o conjugado induzido de um motor de indução monofásico.
 - Compreender o funcionamento básico dos motores de relutância e de histerese.
 - Compreender o funcionamento de um motor de passo.
 - Compreender o funcionamento de um motor CC sem escovas.
-

Os Capítulos 3 a 6 foram dedicados ao funcionamento das duas principais classes de máquinas CA (síncronas e de indução) dos sistemas de potência *trifásicos*. Os motores e os geradores desses tipos são de longe os mais comuns presentes em ambientes comerciais e industriais de maior porte. Entretanto, a maioria das residências e das pequenas empresas não dispõe de energia elétrica trifásica. Em tais locais, todos os motores devem funcionar a partir de fontes de potência monofásicas. Este capítulo trata da teoria e funcionamento dos dois principais tipos de motores monofásicos: o motor universal e o motor de indução monofásico. O motor universal, que é uma extensão imediata do motor CC série, será descrito na Seção 9.1.

O motor de indução monofásico será descrito nas Seções 9.2 a 9.5. O maior problema do projeto de motores de indução monofásicos é que, diferentemente das fontes de potência trifásicas, uma fonte monofásica *não* produz um campo magnético girante. Em vez disso, o campo magnético produzido por uma fonte monofásica permanece estacionário em direção e *pulsa* com o tempo. Como não há um campo magnético resultante girante, os motores de indução convencionais não podem funcionar e tornam-se necessários motores especialmente projetados.

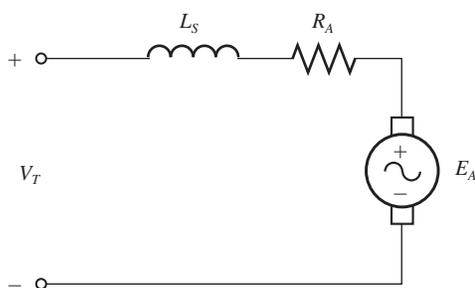


FIGURA 9-1
Circuito equivalente de um motor universal.

Além disso, há diversos motores para aplicações especiais que não foram discutidos anteriormente. Entre eles, estão os motores de relutância, motores de histerese, motores de passo e motores CC sem escovas. Eles serão descritos na Seção 9.6.

9.1 O MOTOR UNIVERSAL

Possivelmente, a abordagem mais simples de um modelo de motor que funcione com uma fonte de potência CA monofásica seja usar uma máquina CC e colocá-la a funcionar com uma fonte de tensão CA. Lembre-se do Capítulo 7 que o conjugado induzido de um motor CC é dado por

$$\tau_{\text{ind}} = K\phi I_A \quad (7-49)$$

Se a polaridade da tensão aplicada a um motor CC em derivação ou série for invertida, *ambos* o sentido do fluxo de campo *e* o sentido da corrente de armadura irão se inverter. Como resultado, o conjugado induzido continuará com o mesmo sentido de antes. Portanto, deve ser possível obter um conjugado pulsante, mas unidirecional, a partir de um motor CC ligado a uma fonte de potência CA.

Essa abordagem é prática apenas para o motor CC série (veja a Figura 9-1), porque a corrente de armadura e a corrente de campo da máquina devem ser invertidas exatamente no mesmo instante. No caso do motor CC em derivação, a indutância de campo muito elevada tende a retardar a inversão da corrente de campo e portanto a reduzir de forma inaceitável o conjugado médio induzido do motor.

Para que um motor CC série funcione efetivamente em CA, as estruturas do estator e dos polos do campo devem ser completamente laminadas. Se não fossem completamente laminadas, as perdas no núcleo seriam enormes. Quando os polos e o estator são laminados, o motor é frequentemente denominado *motor universal*, já que ele pode funcionar tanto com uma fonte de tensão CA como CC.

Quando o motor está funcionando com uma fonte CA, a comutação é muito mais pobre do que seria com uma fonte CC. O faiscamento extra nas escovas é causado pela ação de transformador que induz tensões nas bobinas em comutação. Essas faíscas reduzem de forma significativa a vida das escovas e podem ser uma fonte de interferência de radiofrequência em certos ambientes.

As características típicas de conjugado *versus* velocidade de um motor universal estão mostradas na Figura 9-2, sendo dadas para fontes de tensão CC e CA. Há duas razões para a diferença entre as características de conjugado *versus* velocidade da mesma máquina quando ela está funcionando com uma fonte de tensão CC e com tensão CA:

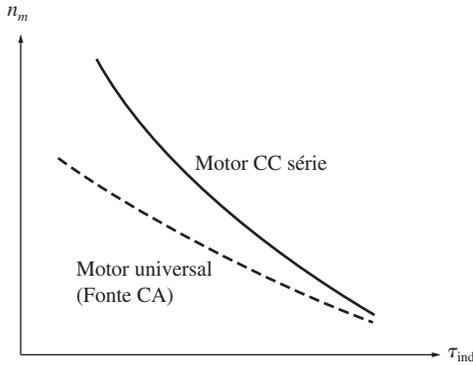


FIGURA 9-2
 Comparação das características de conjugado *versus* velocidade de um motor universal quando está funcionando com fontes de tensão CA e CC.

1. Os enrolamentos de armadura e de campo têm uma reatância bem elevada em 50 ou 60 Hz. Uma parte significativa da tensão de entrada sofre queda reativa nesses enrolamentos. Portanto, para uma dada tensão de entrada, o valor de E_A é *menor* durante o funcionamento em CA do que em CC. Como $E_A = K\phi\omega_m$, o motor será mais *lento* com corrente alternada do que com corrente contínua, para uma dada corrente de armadura e conjugado induzido.
2. Além disso, a tensão de pico de um sistema CA é $\sqrt{2}$ vezes a sua tensão eficaz. Assim, a saturação magnética poderia ocorrer próximo da corrente de pico da máquina. Para um dado nível de corrente, essa saturação pode diminuir de forma significativa o fluxo eficaz do motor, tendendo a reduzir o conjugado induzido da máquina. Por outro lado, lembre-se de que uma diminuição de fluxo aumenta a velocidade de uma máquina CC, de modo que esse efeito pode compensar parcialmente a diminuição de velocidade causada pelo primeiro efeito.

Aplicações dos motores universais

O motor universal tem uma característica de conjugado *versus* velocidade com a acentuada inclinação em declive de um motor CC série, de modo que não é adequado para aplicações de velocidade constante. Entretanto, ele é compacto e fornece mais conjugado por ampère do que qualquer outro motor monofásico. Portanto, ele é usado quando são importantes um peso bruto e um conjugado elevado.

Aplicações típicas desse motor são em aspiradores de pó, eletrodomésticos de cozinha, furadeiras elétricas e outros aparelhos portáteis similares.

Controle da velocidade dos motores universais

Assim como no caso do motor CC série, a melhor maneira de controlar a velocidade de um motor universal é variando a tensão eficaz de entrada. Quanto mais elevada for a tensão eficaz de entrada, maior será a velocidade resultante do motor. Características típicas de conjugado *versus* velocidade de um motor universal em função da tensão estão mostradas na Figura 9-3.

Na prática, a tensão média aplicada a esse motor é variada por meio de um circuito de controle de estado sólido. Dois desses circuitos de controle para velocidade estão mostrados na Figura 9-4. Os resistores variáveis mostrados nessas figuras são os botões de ajuste dos motores (por exemplo, no caso de uma furadeira manual de velocidade variável, esse resistor seria o “gatilho” da furadeira).

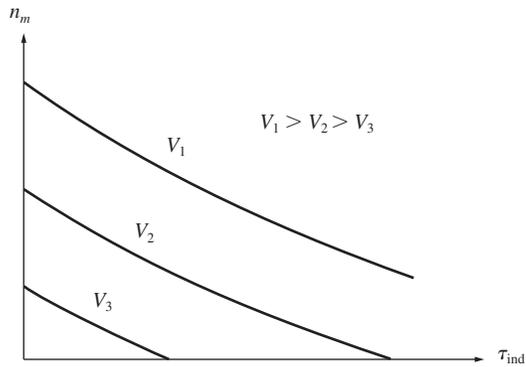


FIGURA 9-3 O efeito da variação da tensão de terminal sobre a característica de conjugado *versus* velocidade de um motor universal.

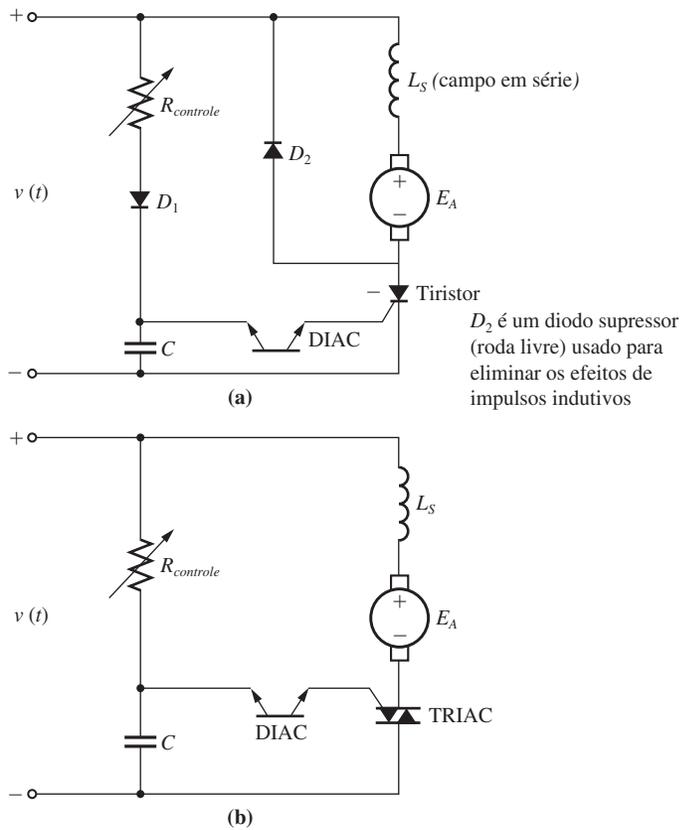


FIGURA 9-4 Exemplos de circuitos de controle de velocidade para motores universais. (a) Meia onda; (b) onda completa.

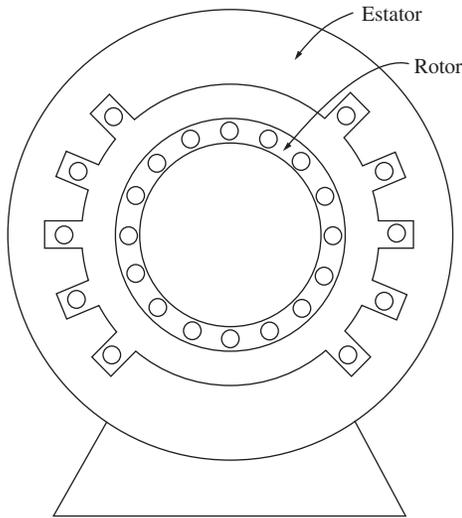


FIGURA 9-5
 Construção de um motor de indução monofásico. O rotor é o mesmo de um motor de indução trifásico, mas o estator tem apenas uma fase distribuída.

9.2 INTRODUÇÃO AOS MOTORES DE INDUÇÃO MONOFÁSICOS

Outro motor monofásico comum é a versão monofásica do motor de indução. Um motor de indução, com rotor de gaiola de esquilo e estator monofásico, está mostrado na Figura 9-5.

Os motores de indução monofásicos apresentam uma séria desvantagem. Como há apenas uma fase no enrolamento do estator, o campo magnético em um motor de indução monofásico não gira. Em vez disso, ele *pulsa*, primeiro intensamente e depois mais fracamente, mas sempre na mesma direção. Como não há campo magnético girante no estator, um motor de indução monofásico não tem *conjugado de partida*.

Isso pode ser visto facilmente examinando-se o motor quando seu rotor está parado. O fluxo do estator da máquina primeiro cresce e então decresce, mas sempre na mesma direção. Como o campo magnético do estator não gira, *não há movimento relativo* entre o campo do estator e as barras do rotor. Portanto, nenhuma tensão é induzida oriunda do movimento relativo do rotor, nenhuma corrente circula e consequentemente nenhum conjugado é induzido. Na realidade, uma tensão é induzida nas barras do rotor pela ação de transformador ($d\phi/dt$) e, como as barras estão em curto-circuito, há uma corrente circulando no rotor. Entretanto, como esse campo magnético está alinhado com o campo magnético do estator, nenhum conjugado líquido é produzido no rotor porque

$$\begin{aligned} \tau_{\text{ind}} &= k\mathbf{B}_R \times \mathbf{B}_S & (3-58) \\ &= kB_R B_S \text{ sen } \gamma \\ &= kB_R B_S \text{ sen } 180^\circ = 0 \end{aligned}$$

Quando está parado, o motor assemelha-se a um transformador com um enrolamento secundário em curto-circuito (veja a Figura 9-6).

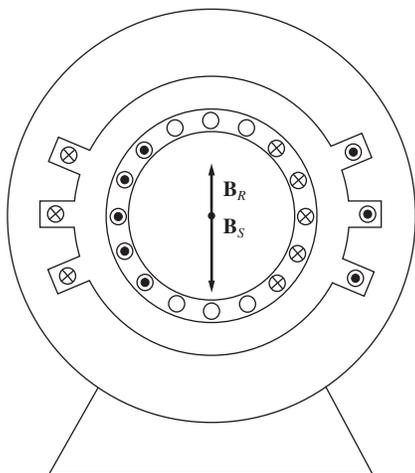


FIGURA 9-6

O motor de indução monofásico na partida. O enrolamento do estator induz tensões e corrente opostas no circuito do rotor, resultando em um campo magnético *alinhado* com o campo magnético do estator. $\tau_{\text{ind}} = 0$.

O fato de que motores de indução monofásicos não têm conjugado de partida intrínseco foi um impedimento sério ao desenvolvimento inicial do motor de indução. Quando os primeiros motores de indução foram construídos, no final da década de 1880 e início da década de 1890, os primeiros sistemas de potência CA eram monofásicos de 133 Hz. Com os materiais e técnicas disponíveis naquela época, era impossível construir um motor que funcionasse bem. O motor de indução não se tornou um produto de prateleira, pronto para ser adquirido, senão após o desenvolvimento dos sistemas de potência trifásicos de 25 Hz a partir de meados da década de 1890.

Entretanto, *logo que o rotor começa a girar, um conjugado induzido é produzido nele*. Há duas teorias básicas que explicam por que um conjugado é induzido no rotor, tão logo ele comece a girar. Uma é denominada *teoria do duplo campo girante* dos motores de indução monofásicos. A outra é denominada *teoria do campo cruzado* dos motores de indução monofásicos. Essas abordagens serão descritas a seguir.

A teoria do duplo campo girante dos motores de indução monofásicos

Basicamente, a teoria do duplo campo girante dos motores de indução monofásicos afirma que um campo magnético pulsante estacionário pode ser decomposto em dois campos magnéticos *girantes*, de mesmo módulo e girando em sentidos opostos. O motor de indução responde diferentemente a cada um desses campos magnéticos em separado. O conjugado líquido resultante da máquina será a soma dos conjugados produzidos por cada um desses campos magnéticos.

A Figura 9-7 mostra como um campo magnético pulsante estacionário pode ser decomposto em dois campos magnéticos girantes iguais e opostos (progressivo e retrógrado). A densidade de fluxo do campo magnético estacionário é dada por

$$\mathbf{B}_S(t) = (B_{\text{max}} \cos \omega t) \hat{\mathbf{j}} \quad (9-1)$$

Um campo magnético girante horário (HO) pode ser expresso como

$$\mathbf{B}_{\text{HO}}(t) = \left(\frac{1}{2} B_{\text{max}} \cos \omega t\right) \hat{\mathbf{i}} - \left(\frac{1}{2} B_{\text{max}} \sin \omega t\right) \hat{\mathbf{j}} \quad (9-2)$$

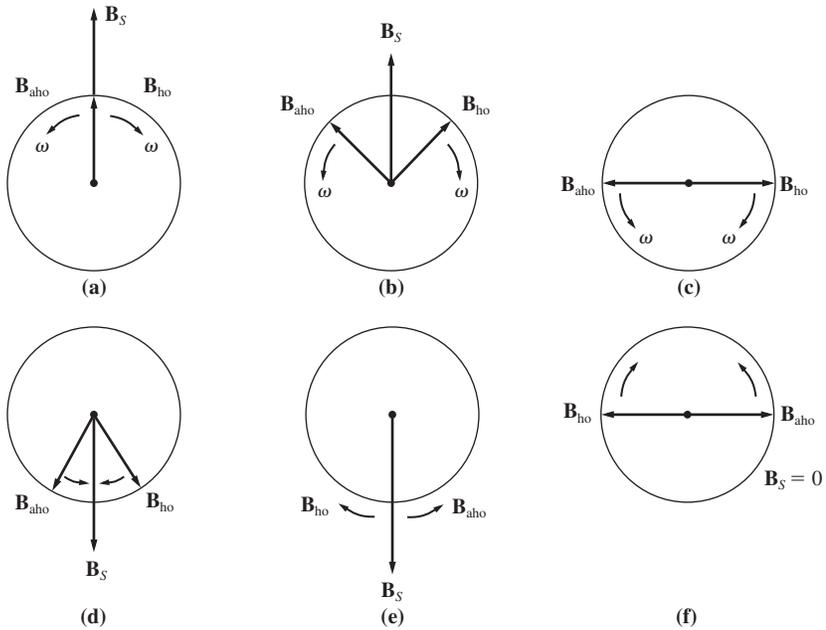


FIGURA 9-7

A decomposição de um campo magnético pulsante em dois campos magnéticos de mesmo módulo girando em sentidos opostos (campos progressivo e retrógrado). Em qualquer instante, observe que a soma vetorial dos dois campos magnéticos está sempre em uma linha vertical.

e um campo magnético girante anti-horário (AHO) pode ser expresso como

$$\mathbf{B}_{\text{AHO}}(t) = \left(\frac{1}{2} B_{\text{max}} \cos \omega t\right) \hat{\mathbf{i}} + \left(\frac{1}{2} B_{\text{max}} \text{sen } \omega t\right) \hat{\mathbf{j}} \quad (9-3)$$

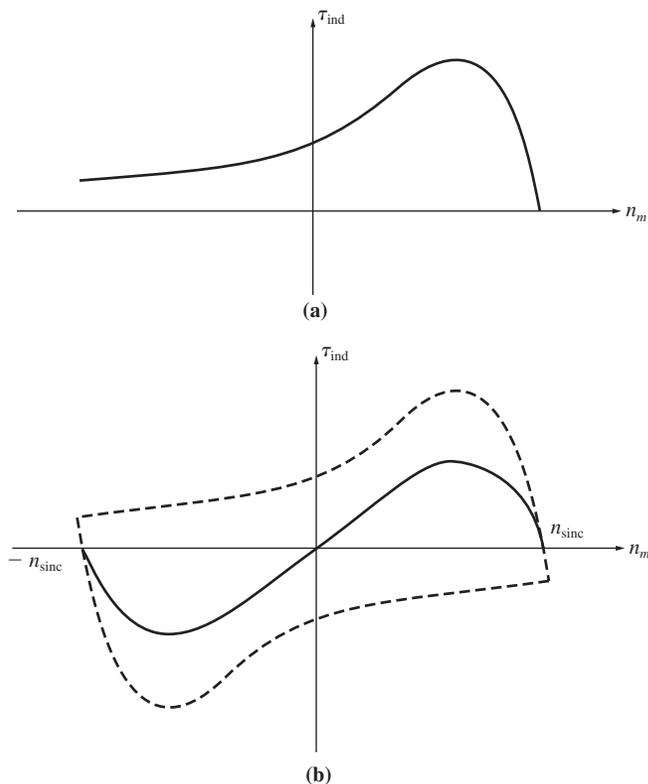
Observe que a soma dos campos magnéticos horário (HO) e anti-horário (AHO) é igual ao campo magnético pulsante estacionário \mathbf{B}_S :

$$\mathbf{B}_S(t) = \mathbf{B}_{\text{HO}}(t) + \mathbf{B}_{\text{AHO}}(t) \quad (9-4)$$

A característica de conjugado *versus* velocidade de um motor de indução trifásico* em resposta a um campo magnético está mostrada na Figura 9-8a. Um motor de indução monofásico responde a cada um dos dois campos magnéticos presentes nele, de modo que o conjugado induzido resultante do motor é a *diferença* entre as duas curvas de conjugado *versus* velocidade. Esse conjugado resultante líquido está mostrado na Figura 9-8b. Observe que, como não há conjugado líquido na velocidade zero, esse motor não tem conjugado de partida.

A característica de conjugado *versus* velocidade da Figura 9-8b não é uma descrição bem exata do conjugado existente em um motor monofásico. Ela foi formada pela superposição de duas características trifásicas e ignorou o fato de que em um motor monofásico ambos os campos magnéticos estão *simultaneamente* presentes.

* N. de T.: Pode ser útil relembrar a Figura 6-19 e os respectivos parágrafos no texto daquela seção.

**FIGURA 9-8**

(a) A característica de conjugado *versus* velocidade de um motor de indução trifásico. (b) As curvas características de conjugado *versus* velocidade de dois campos magnéticos girantes iguais e opostos do estator.

Se potência elétrica for aplicada a um motor trifásico enquanto ele é forçado a girar em sentido retrógrado (horário), então as correntes no rotor serão muito elevadas* (veja a Figura 9-9a). Entretanto, como a frequência no rotor também é muito elevada, isso fará com que a reatância do rotor torne-se muito maior do que a sua resistência. Como a reatância do rotor é bem mais elevada, sua corrente atrasa-se em relação à tensão em quase 90° , produzindo um campo magnético que está angularmente a quase 180° do campo magnético do estator (veja a Figura 9-10). O conjugado induzido no motor é proporcional ao seno do ângulo entre os dois campos. Como o seno de um ângulo próximo de 180° é um número muito pequeno, resulta que o conjugado do motor será muito pequeno. Entretanto, as correntes extremamente altas do rotor compensam em parte o efeito do distanciamento angular entre os campos magnéticos (veja a Figura 9-b).

Por outro lado, em um motor monofásico, ambos os campos magnéticos, progressivo e retrógrado, estão presentes e ambos são produzidos pela *mesma* corrente.

* N. de T.: Pode ser útil relembra a Figura 6-11 e os respectivos parágrafos no texto daquela seção.

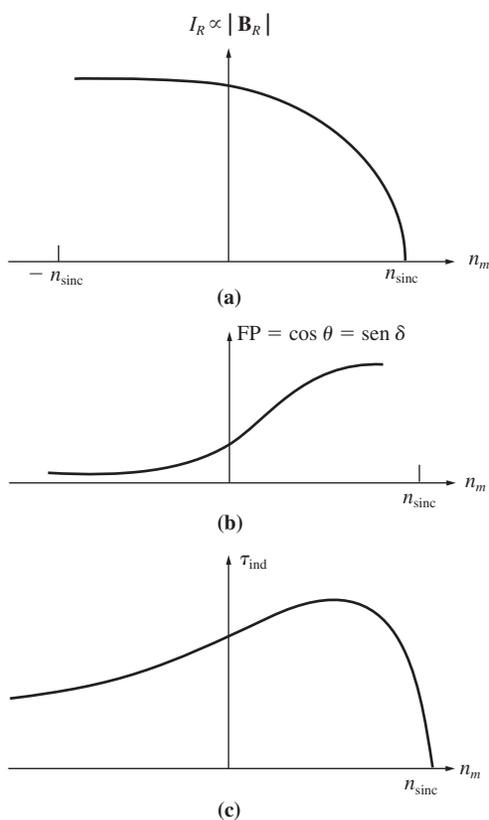


FIGURA 9-9
 A característica de conjugado *versus* velocidade de um motor de indução trifásico é proporcional à intensidade do campo magnético do rotor e ao seno do ângulo entre os campos. Quando o rotor gira no sentido retrógrado, as correntes I_R e I_S são muito elevadas. Entretanto, como o ângulo entre os campos é muito grande, o conjugado do motor é reduzido.

Os campos magnéticos progressivo e retrógrado do motor contribuem cada um com uma componente da tensão total do estator e, em certo sentido, estão em série entre si. Como ambos os campos magnéticos estão presentes, o campo magnético girante progressivo (que tem uma elevada resistência efetiva de rotor R_2/s) irá limitar o fluxo da corrente do estator no motor (que produz os campos progressivo e retrógrado). Como a corrente que alimenta o campo magnético retrógrado do estator está limitada a um valor baixo e como o campo magnético retrógrado do rotor faz um ângulo muito grande em relação ao campo magnético retrógrado do estator, o conjugado devido aos campos magnéticos retrógrados será *muito* pequeno quando se está próximo da velocidade síncrona. Uma característica mais exata de conjugado *versus* velocidade para o motor de indução monofásico está mostrada na Figura 9-11.

Além do conjugado líquido médio mostrado na Figura 9-11, há pulsações de conjugado com o dobro da frequência do estator. Essas pulsações de conjugado ocorrem quando os campos magnéticos progressivo e retrógrado cruzam-se duas vezes a cada ciclo. Embora essas pulsações não produzam conjugado médio, elas intensificam de fato a vibração do motor, o que torna os motores de indução monofásicos mais ruidosos do que os motores trifásicos de mesmo tamanho. Não há maneira de se eliminar essas pulsações, porque em um circuito monofásico a potência instantânea sempre ocorre em pulsos. Um projetista de motores deve levar em consideração essa vibração inerente no projeto mecânico dos motores monofásicos.

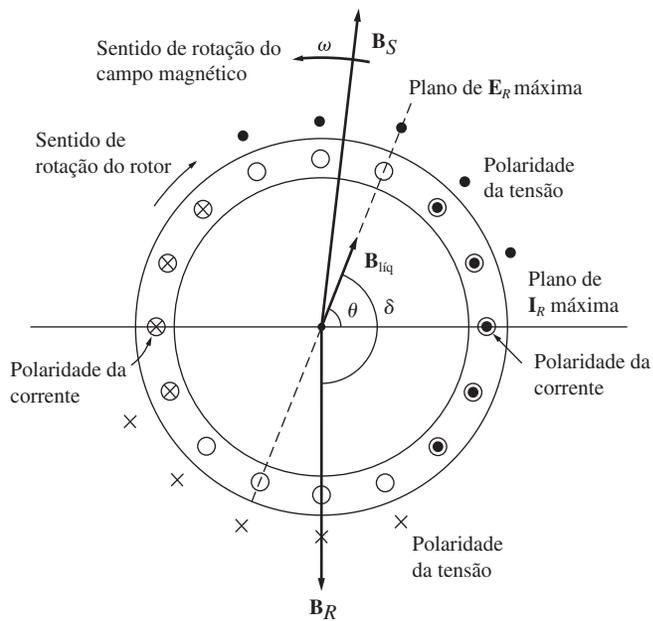


FIGURA 9-10
Quando o rotor do motor é forçado a girar de forma retrógrada, o ângulo γ entre B_R e B_S aproxima-se de 180° .

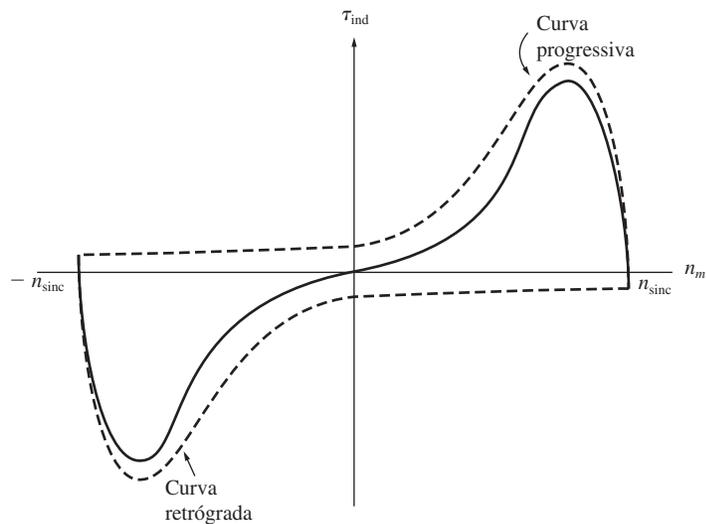


FIGURA 9-11
A característica de conjugado *versus* velocidade de um motor de indução monofásico, levando em consideração a limitação de corrente sobre o campo magnético girante retrógrado causada pela presença do campo magnético girante progressivo.

A teoria do campo cruzado dos motores de indução monofásicos

A teoria do campo cruzado dos motores de indução monofásicos trata o motor de indução desde um ponto de vista totalmente diferente. Essa teoria ocupa-se das tensões e correntes que o campo magnético estacionário do estator pode induzir nas barras do rotor quando este está em movimento.

Considere um motor de indução monofásico com um rotor que foi levado até a velocidade de operação por meio de algum método externo. Esse motor está mostrado na Figura 9-12a. As tensões são induzidas nas barras desse rotor, com a tensão de pico ocorrendo nos enrolamentos que passam diretamente abaixo dos enrolamentos do estator. Por sua vez, essas tensões produzem um fluxo de corrente no rotor que, devido à sua elevada reatância, está atrasada em relação à tensão em quase 90°. Como o rotor está girando próximo da velocidade síncrona, esse intervalo de tempo de 90° na corrente produz um deslocamento *angular* de quase 90° entre o plano da tensão de pico do rotor e o plano da corrente de pico. O campo magnético resultante do rotor está mostrado na Figura 9-12b.

O campo magnético do rotor é menor do que o campo magnético do estator devido às perdas no rotor, mas eles diferem entre si em aproximadamente 90° *tanto*

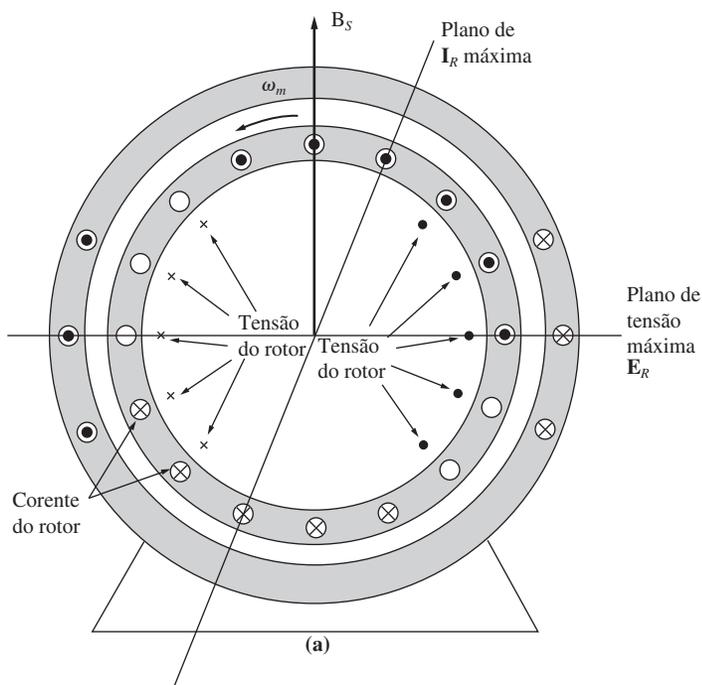


FIGURA 9-12

(a) O desenvolvimento de conjugado induzido em um motor de indução monofásico, como é explicado pela teoria do campo cruzado. Se o campo do estator estiver pulsando, ele induzirá tensões nas barras do rotor, como está mostrado pelas marcas dentro do rotor. Entretanto, a corrente do rotor está atrasada em aproximadamente 90° em relação à tensão do rotor e, se o rotor estiver girando, a corrente de pico do rotor ocorrerá em um ângulo diferente daquele da tensão do rotor.

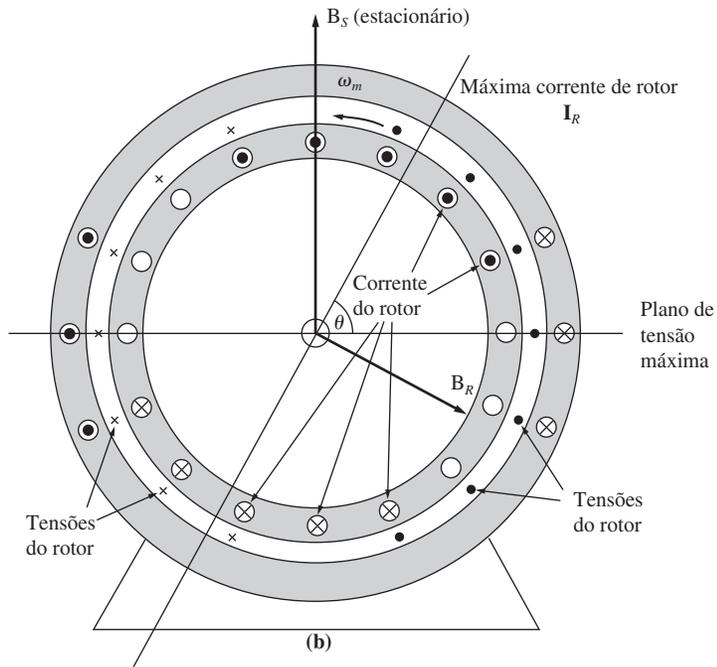


FIGURA 9-12 (conclusão)

(b) Essa corrente atrasada de rotor produz um campo magnético em um ângulo diferente do ângulo do campo magnético do estator.

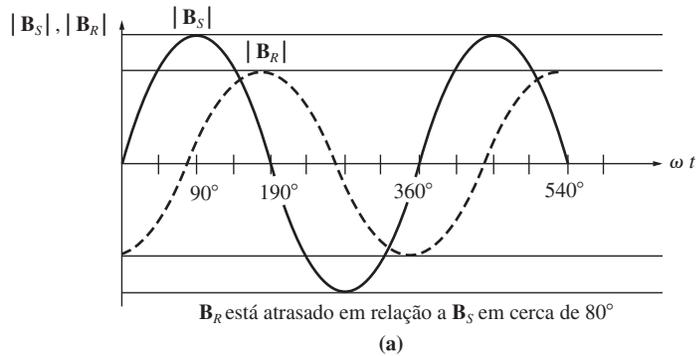


FIGURA 9-13

(a) Os módulos dos campos magnéticos em função do tempo.

no espaço como no tempo. Se esses dois campos magnéticos forem adicionados em instantes diferentes, veremos que o campo magnético total do motor está girando no sentido anti-horário (veja a Figura 9-13). Com um campo magnético presente no

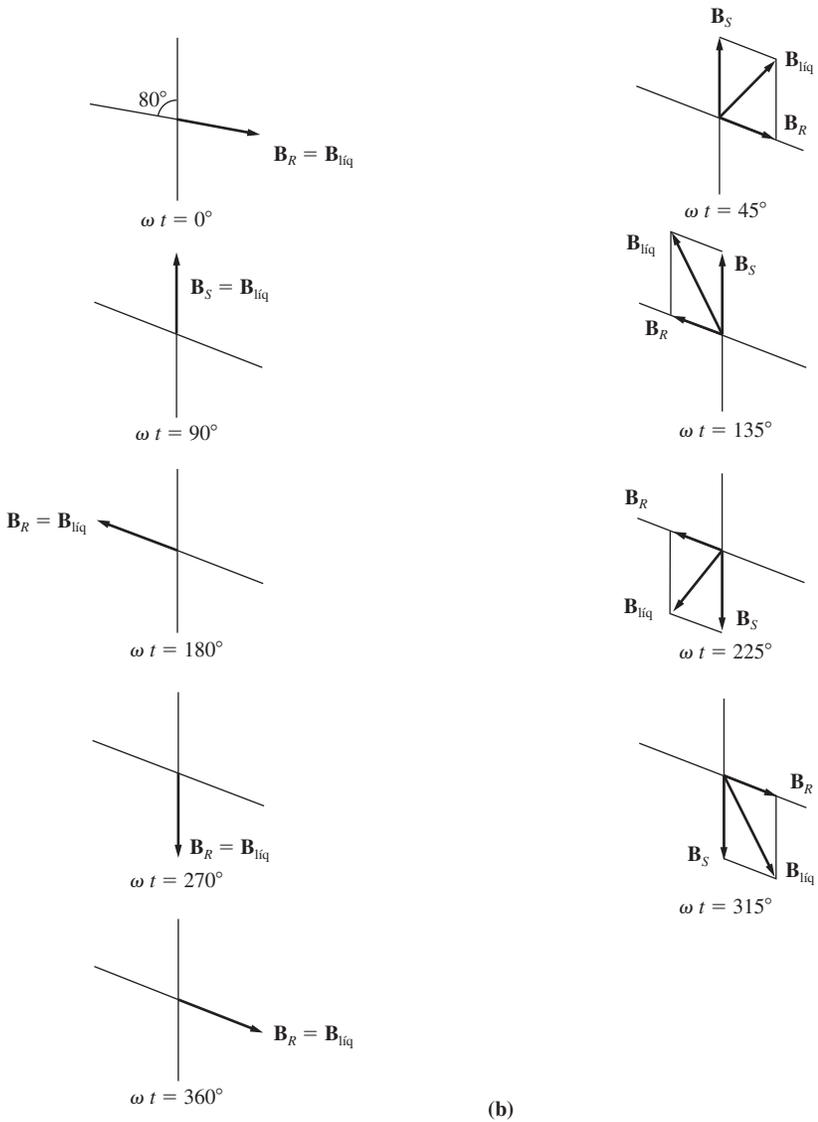


FIGURA 9-13 (conclusão)

(b) A soma vetorial dos campos magnéticos do rotor e do estator em diversos instantes, mostrando um campo magnético líquido resultante que gira no sentido anti-horário.

motor, o motor de indução desenvolverá um conjugado líquido resultante no sentido do movimento e esse conjugado manterá o rotor girando.

Se o rotor do motor tivesse sido inicialmente posto a girar no sentido horário, então o conjugado resultante seria horário e novamente manteria o rotor girando.

9.3 PARTIDA DE MOTORES DE INDUÇÃO MONOFÁSICOS

Como foi explicado anteriormente, um motor de indução monofásico não tem conjugado de partida próprio. Há três técnicas que usualmente são utilizadas para dar partida a esses motores. Os motores de indução monofásicos são classificados de acordo com os métodos usados para produzir o conjugado de partida. Essas técnicas de partida diferem em custo e quantidade produzida de conjugado de partida. Um engenheiro normalmente usa a técnica menos dispendiosa que atenda às necessidades de conjugado de uma dada aplicação. As três técnicas principais de partida são

1. Enrolamentos de fase dividida
2. Enrolamentos com capacitores
3. Polos sombreados de estator

Todas essas técnicas de partida são métodos em que um dos dois campos magnéticos girantes do motor é tornado mais forte do que o outro. Com isso, o motor recebe um empurrão inicial em um sentido ou outro.

Enrolamentos de fase dividida

Um motor de fase dividida é um motor de indução monofásico com dois enrolamentos de estator: um enrolamento de estator principal (P) e um enrolamento auxiliar de partida (A) (veja a Figura 9-14). Esses dois enrolamentos são instalados com um distanciamento angular de 90 graus elétricos sobre o estator do motor. O enrolamento auxiliar é projetado para ser desligado do circuito a uma certa velocidade, que é ajustada por meio de uma chave centrífuga. O enrolamento auxiliar é projetado para ter uma razão resistência/reatância mais elevada do que o enrolamento principal, de

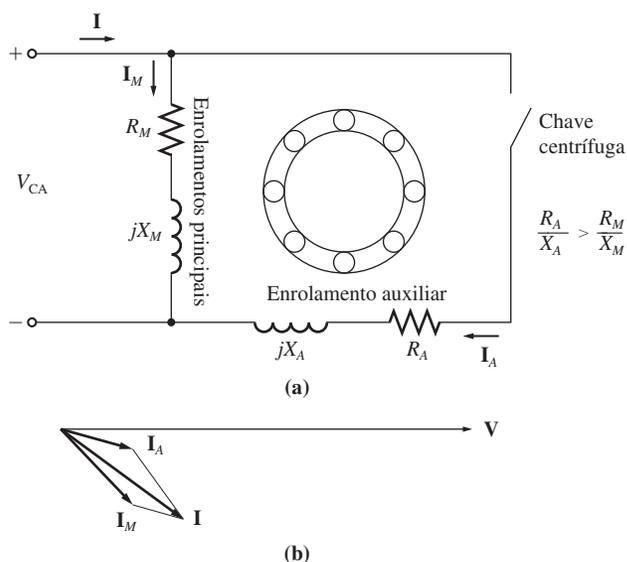


FIGURA 9-14

(a) Um motor de indução de fase dividida. (b) As correntes do motor na partida.

modo que a corrente no enrolamento auxiliar estará *adiantada* em relação à corrente do enrolamento principal. Usualmente, a razão R/X mais elevada é conseguida usando um fio mais fino no enrolamento auxiliar. Pode-se usar um fio mais fino porque o enrolamento auxiliar funciona somente na partida e, portanto, não haverá corrente plena circulando continuamente nele.

Para compreender a função do enrolamento auxiliar, consulte a Figura 9-15. Como a corrente do enrolamento auxiliar está adiantada em relação à corrente do

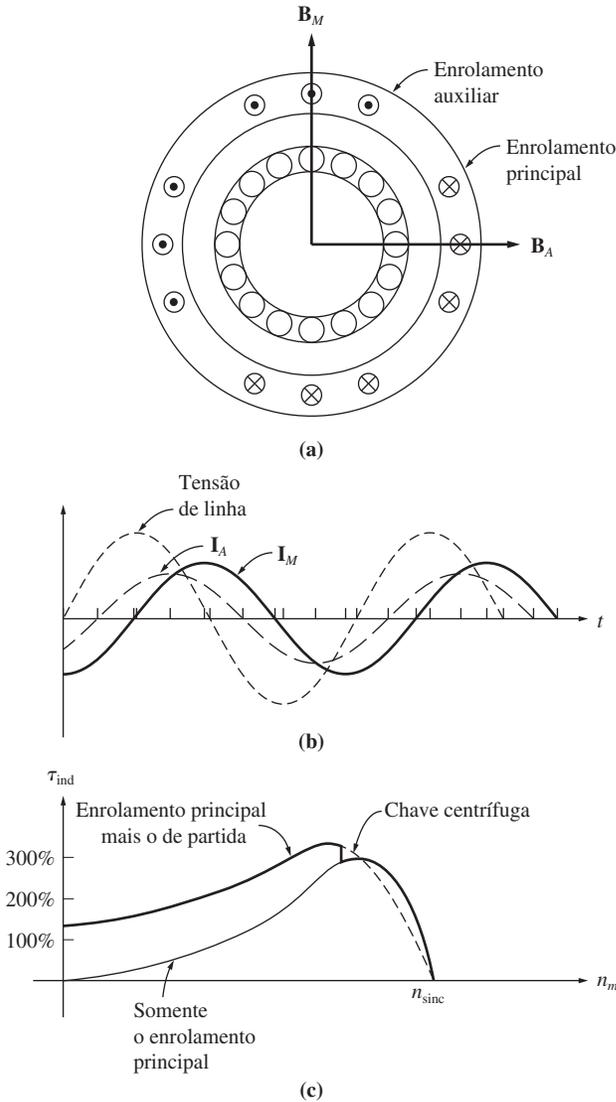
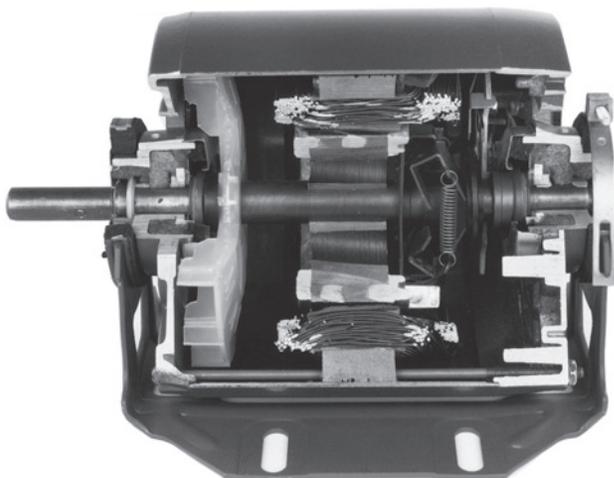


FIGURA 9-15

(a) Relação entre os campos magnéticos principal e auxiliar. (b) O pico de I_A ocorre antes do pico de I_M , produzindo uma rotação resultante anti-horária dos campos magnéticos. (c) A característica resultante de conjugado *versus* velocidade.

**FIGURA 9-16**

Vista em corte de um motor de fase dividida, mostrando os enrolamentos principal e auxiliar além da chave centrífuga. (Cortesia de Westinghouse Electric Corporation.)

enrolamento principal, o pico do campo magnético \mathbf{B}_A ocorre antes do pico do campo magnético \mathbf{B}_P . Como o pico de \mathbf{B}_A ocorre antes do pico de \mathbf{B}_M , haverá uma rotação resultante do campo magnético no sentido anti-horário. Em outras palavras, o enrolamento auxiliar faz com que um dos campos magnéticos girantes opostos do rotor seja maior do que o outro, produzindo um conjugado de partida líquido para o motor. A Figura 9-15c mostra uma típica característica de conjugado *versus* velocidade.

A Figura 9-16 mostra uma vista em corte de um motor de fase dividida. Vê-se facilmente o enrolamento principal e o auxiliar (o enrolamento auxiliar é o que tem fios de diâmetro menor). Vê-se também a chave centrífuga que desliga o enrolamento auxiliar do circuito quando o motor atinge a velocidade de operação.

Os motores de fase dividida têm um conjugado de partida moderado com uma corrente de partida baixa. Eles são usados em aplicações que não exigem conjugados de partida muito elevados, como ventiladores, sopradores e bombas centrífugas. Estão disponíveis em tamanhos da faixa de potência fracionária e são bem baratos.

Em um motor de fase dividida, o pico de corrente no enrolamento auxiliar sempre ocorre antes do pico de corrente no enrolamento principal e, portanto, o pico do campo magnético do enrolamento auxiliar sempre ocorre antes do pico do campo magnético do enrolamento principal. O sentido de rotação do motor depende de o ângulo espacial do campo magnético do enrolamento auxiliar estar 90° à frente ou 90° atrás do ângulo do enrolamento principal. Como esse ângulo pode ser invertido de 90° adiantado para 90° atrasado simplesmente trocando as ligações do enrolamento auxiliar, então *o sentido de rotação do motor pode ser invertido trocando as conexões do enrolamento auxiliar*, e deixando inalteradas as conexões do enrolamento principal.

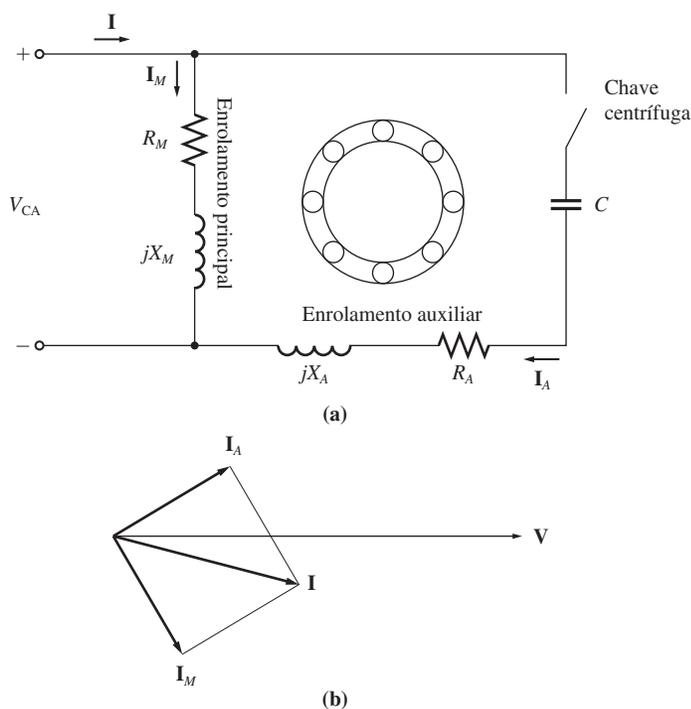


FIGURA 9-17
 (a) Um motor de indução com capacitor de partida. (b) Ângulos das correntes na partida desse motor.

Motores com capacitor de partida

Em algumas aplicações, o conjugado de partida do motor de fase dividida não é suficiente para dar partida à carga no eixo do motor. Nesses casos, motores com capacitor de partida podem ser usados (Figura 9-17). No motor com capacitor de partida, um capacitor é colocado em série com o enrolamento auxiliar do motor. Pela escolha apropriada do valor do capacitor, a força magnetomotriz da corrente de partida do enrolamento auxiliar poderá ser ajustada para ser igual à força magnetomotriz da corrente do enrolamento principal e o ângulo de fase da corrente no enrolamento auxiliar poderá ser tal que a corrente estará adiantada de 90° em relação à corrente do enrolamento principal. Como os dois enrolamentos estão fisicamente separados de 90° , uma diferença de fase entre as correntes de 90° produzirá no estator um campo magnético girante uniforme simples e o motor irá se comportar exatamente como se ele estivesse partindo com uma fonte de potência trifásica. Nesse caso, o conjugado de partida do motor pode ser superior a 300% do seu valor nominal (veja a Figura 9-18).

Motores com capacitor de partida são mais caros do que os motores de fase dividida e são usados em aplicações em que um conjugado elevado de partida é absolutamente necessário. Aplicações típicas desses motores são em compressores, bombas, ar condicionado e em outros tipos de equipamento cujas partidas ocorrem com carga (veja a Figura 9-19).

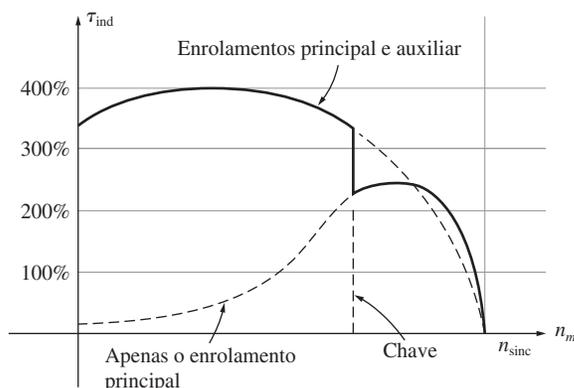


FIGURA 9-18

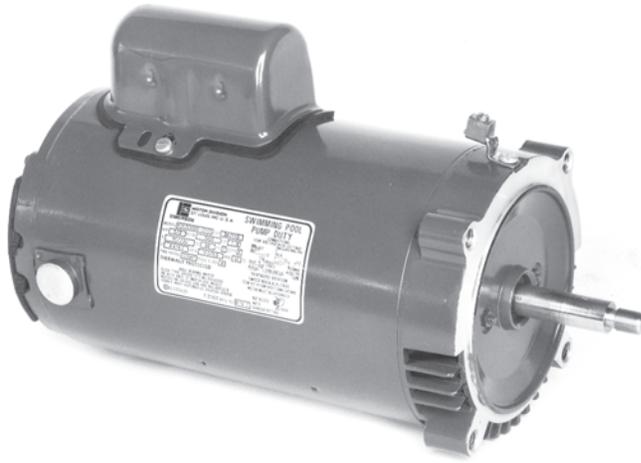
Característica de conjugado *versus* velocidade de um motor de indução com capacitor de partida.

Motores com capacitor permanente e motores com dois capacitores

O capacitor de partida faz um trabalho tão bom de melhoria da característica de conjugado *versus* velocidade de um motor de indução que algumas vezes o enrolamento auxiliar com um capacitor menor é deixado permanentemente no circuito do motor. Se o valor do capacitor for escolhido corretamente, esse motor terá um campo magnético girante perfeitamente uniforme para alguma carga específica e ele se comportará exatamente como um motor de indução trifásico naquele ponto. Esse motor é denominado motor com *capacitor permanente* (Figura 9-20). Os motores de capacitor permanente são mais simples do que os motores com capacitor de partida, porque a chave de partida não é necessária. Para cargas normais, eles são mais eficientes, tendo um fator de potência mais elevado e um conjugado mais suave do que os motores de indução monofásicos ordinários.

Entretanto, os motores com capacitor permanente têm um *conjugado de partida mais baixo* do que os motores com capacitor de partida, porque o capacitor deve ser dimensionado com um certo valor para poder equilibrar as correntes do enrolamento permanente e do auxiliar em condições normais de carga. Como a corrente de partida é muito maior do que a corrente de carga normal, um capacitor que equilibra as fases com cargas normais deixará essas fases muito desequilibradas nas condições de partida.

Se forem necessários o maior conjugado de partida e a melhor condição de operação, dois capacitores poderão ser usados com o enrolamento auxiliar. Um motor como esse é denominado *motor com dois capacitores* (Figura 9-21). O capacitor de valor mais elevado está presente no circuito apenas durante a partida, quando assegura que as correntes do enrolamento principal e do auxiliar sejam aproximadamente equilibradas, permitindo conjugados de partida muito elevados. Quando o motor atinge a velocidade de operação, a chave centrífuga abre e apenas o capacitor permanente é mantido no circuito do enrolamento auxiliar. O capacitor permanente tem o valor correto para manter equilibradas as correntes, para a carga normal de funcionamento do motor. Em um motor como esse, o capacitor permanente tem um valor de 10 a 20% do valor do capacitor de partida.



(a)

Vista explodida de um motor monofásico de uso geral, com partida a capacitor, totalmente fechado com ventilação externa (TFVE) e carcaça 56.



(b)

FIGURA 9-19

(a) Um motor de indução com capacitor de partida. (Cortesia de Emerson Electric Company.) (b) Vista explodida de um motor de indução com capacitor de partida. (Cortesia de Westinghouse Electric Corporation.)

O sentido de rotação de qualquer motor do tipo que usa capacitor pode ser invertido trocando as ligações de seu enrolamento auxiliar.

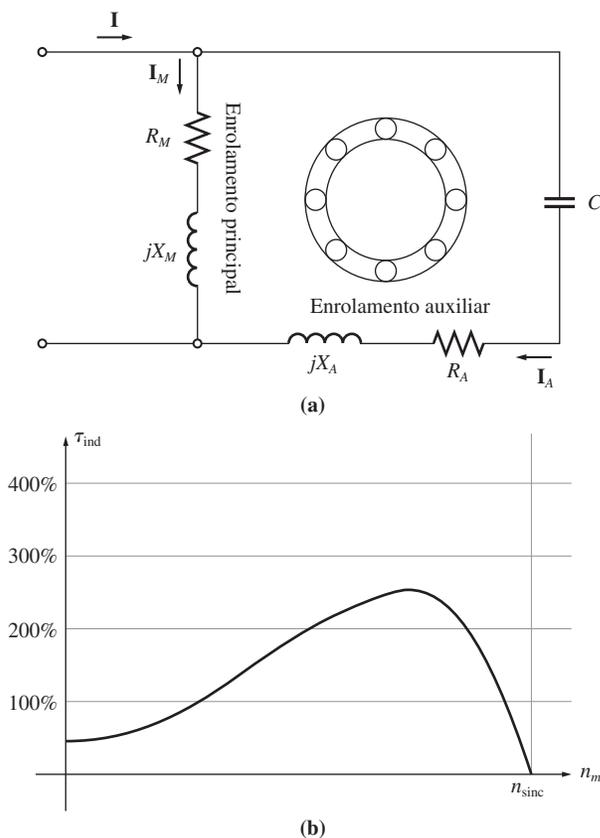


FIGURA 9-20
 (a) Um motor de indução de capacitor permanente. (b) A característica de conjugado *versus* velocidade deste motor.

Motores de polos sombreados

Um motor de indução de polos sombreados é um motor de indução com apenas um enrolamento principal. Em vez de ter um enrolamento auxiliar, ele tem polos salientes e uma parte de cada polo é envolvida com uma bobina em curto-circuito denominada *bobina de sombreamento* (veja Figura 9-22a). Um fluxo variável no tempo é induzido nos polos pelo enrolamento principal. Quando o fluxo do polo varia, ele induz uma tensão e uma corrente na bobina de sombreamento que se *opõe* à variação original de fluxo. Essa oposição *retarda* as variações de fluxo abaixo das regiões sombreadas das bobinas e, portanto, produz um ligeiro desequilíbrio entre os dois campos magnéticos opostos girantes. A rotação resultante é no sentido que vai da parte não sombreada para à parte sombreada da face polar. A característica de conjugado *versus* velocidade de um motor de polos sombreados está mostrada na Figura 9-22b.

Os polos sombreados produzem menos conjugado de partida do que qualquer outro tipo de sistema de partida para motor de indução. São muito menos eficientes e têm um escorregamento muito maior do que outros tipos de motores de indução monofásicos. Esses polos são usados somente em motores muito pequenos (1/20 HP

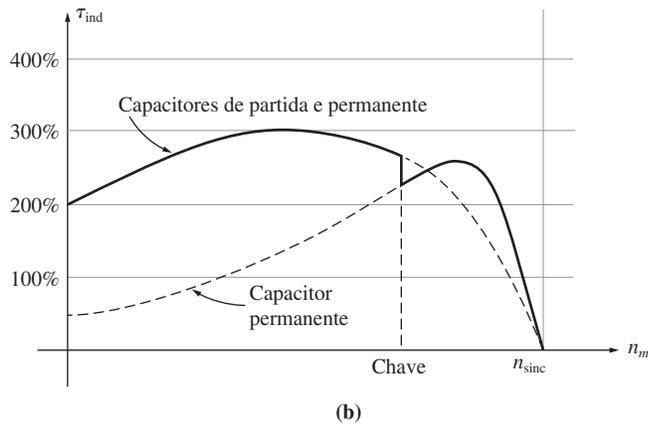
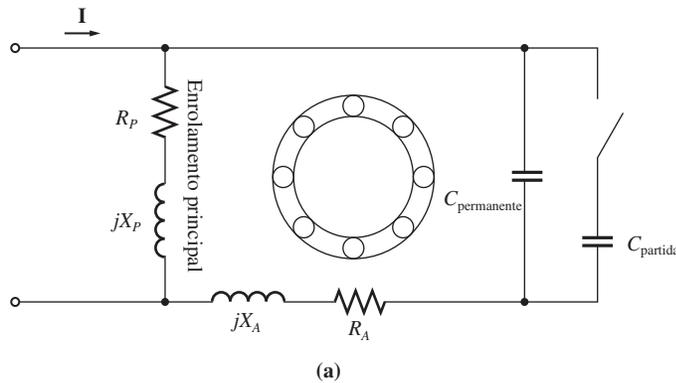


FIGURA 9-21 (a) Um motor de indução de dois capacitores. (b) A característica de conjugado *versus* velocidade deste motor.

e menos) com exigências muito baixas de conjugado de partida. Nos casos em que é possível usá-los, os motores de polos sombreados constituem a opção mais barata disponível.

Como os motores de polos sombreados dependem de uma bobina de sombreamento para produzir seu conjugado de partida, não há uma maneira fácil de inverter o sentido de rotação de um motor como este. Para também dispor de inversão, é necessário instalar duas bobinas de sombreamento em cada uma das faces polares e seletivamente colocar em curto-circuito uma ou outra dessas bobinas de sombreamento. Veja as Figuras 9-23 e 9-24.

Comparação de motores de indução monofásicos

Os motores de indução monofásicos podem ser classificados de melhor a pior em termos de suas características de partida e operação:

1. De dois capacitores
2. Com capacitor de partida

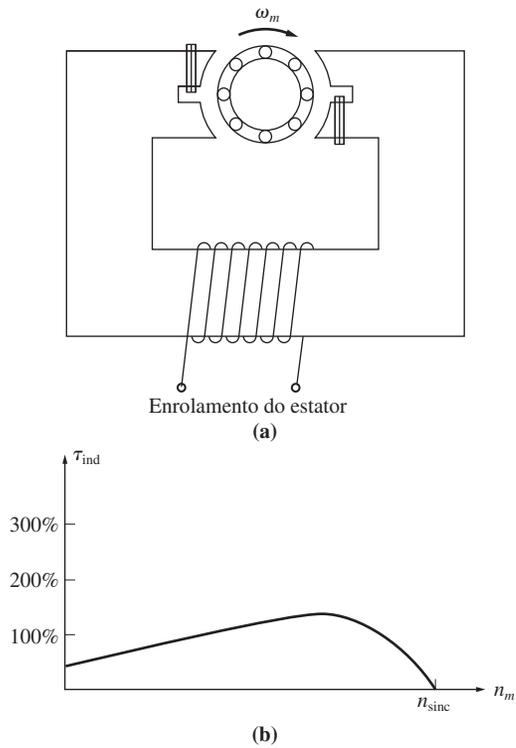


FIGURA 9-22

(a) Um motor de indução de polos sombreados. (b) A característica de conjugado *versus* velocidade desse motor.

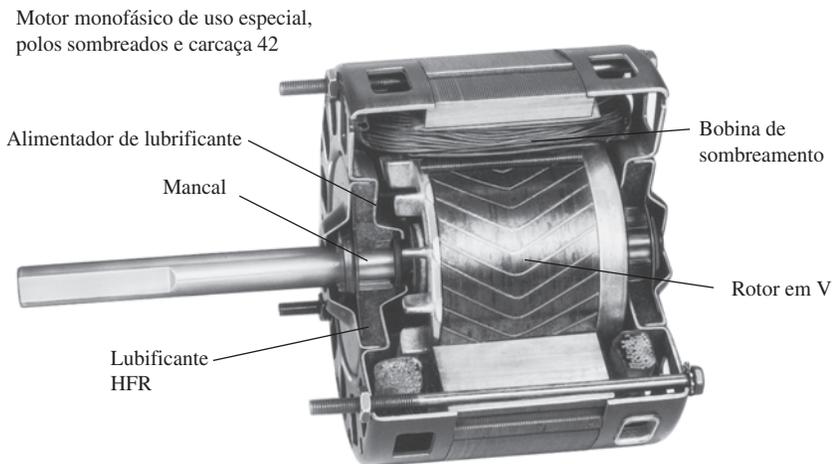


FIGURA 9-23

(a) Vista em corte de um motor de indução de polos sombreados. (Cortesia de Westinghouse Electric Corporation.)

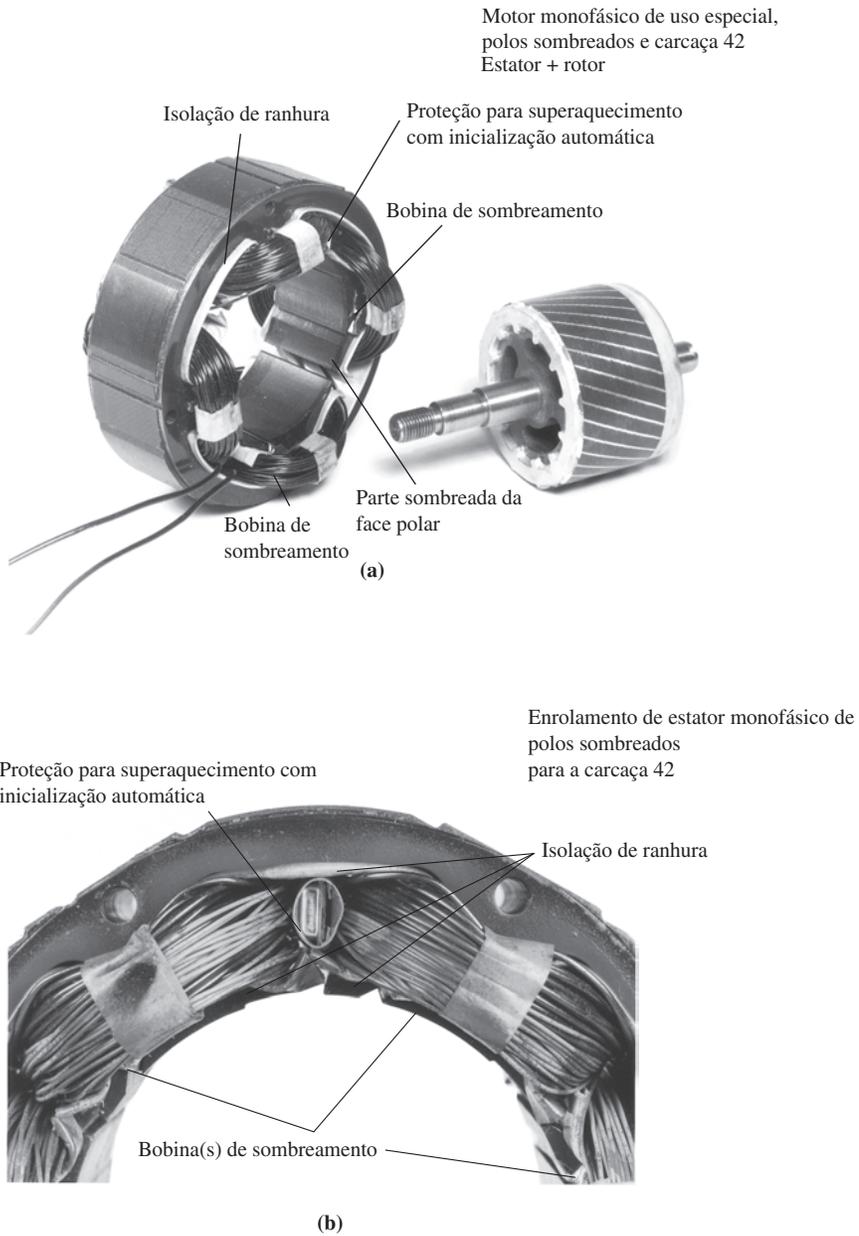


FIGURA 9-24
Vista detalhada da construção de um motor de indução de polos sombreados. (Cortesia de Westinghouse Electric Corporation.)

3. De capacitor permanente
4. De fase dividida
5. De polos sombreados

Naturalmente, o melhor motor também é o mais caro e o pior motor é o mais barato. Além disso, nem todas essas técnicas de partida estão disponíveis em todas as faixas de tamanho dos motores. Para uma dada aplicação qualquer, o engenheiro projetista é quem deverá escolher o motor disponível mais barato, capaz de atender às necessidades da aplicação.

9.4 CONTROLE DE VELOCIDADE DE MOTORES DE INDUÇÃO MONOFÁSICOS

Em geral, a velocidade dos motores de indução monofásicos pode ser controlada do mesmo modo que a velocidade dos motores de indução de múltiplas fases. Para os motores com rotor de gaiola de esquilo, as seguintes técnicas estão disponíveis:

1. Variação da frequência do estator.
2. Mudança do número de polos.
3. Mudança da tensão de terminal aplicada V_T .

Na prática, nos casos que envolvem motores com escorregamento muito elevado, a técnica usual para controlar a velocidade é variar a tensão de terminal do motor. A tensão aplicada ao motor pode ser alterada de três maneiras:

1. Um autotransformador pode ser usado para ajustar continuamente a tensão de linha. Esse é o método mais caro para controlar a velocidade por tensão. É usado somente quando há necessidade de controle de velocidade muito suave.
2. Um circuito controlador de estado sólido pode ser usado para reduzir a tensão eficaz aplicada ao motor pelo controle de fase CA. Os circuitos de controle com estado sólido são consideravelmente mais baratos do que os que funcionam com autotransformadores e estão se tornando cada vez mais comuns.
3. Um resistor pode ser inserido em série com o circuito de estator do motor. Esse é o método mais barato de controle de velocidade, mas tem a desvantagem de que uma potência considerável é perdida no resistor, reduzindo a eficiência total de conversão de potência.

Outra técnica é também usada com motores de escorregamento muito elevado, como motores de polos sombreados. Em vez de usar um autotransformador separado para variar a tensão aplicada ao estator do motor, o próprio enrolamento do estator pode ser usado como autotransformador. A Figura 9-25 mostra uma representação esquemática de um enrolamento principal de estator com diversas derivações. Como o enrolamento do estator está envolvendo um núcleo de ferro, ele se comporta como um autotransformador.

Quando a tensão plena de linha V é aplicada ao enrolamento principal por inteiro, o motor de indução opera normalmente. Em vez disso, suponha que a tensão plena de linha seja aplicada à derivação 2, a derivação central do enrolamento. Então, uma tensão idêntica será induzida na metade superior do enrolamento por ação de transformador e a tensão total no enrolamento será o dobro da tensão de linha aplicada. A tensão total aplicada ao enrolamento foi efetivamente dobrada.

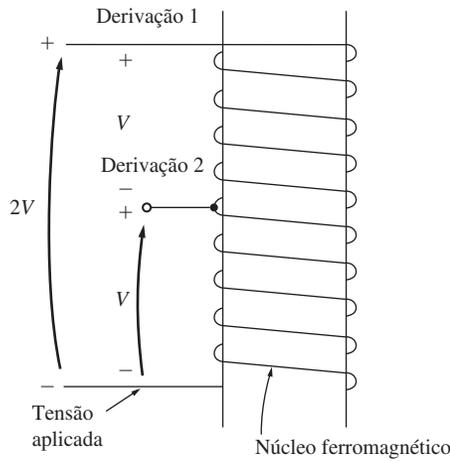


FIGURA 9-25 Uso de um enrolamento de estator como autotransformador. Se a tensão V for aplicada à derivação central do enrolamento, a tensão total no enrolamento será $2V$.

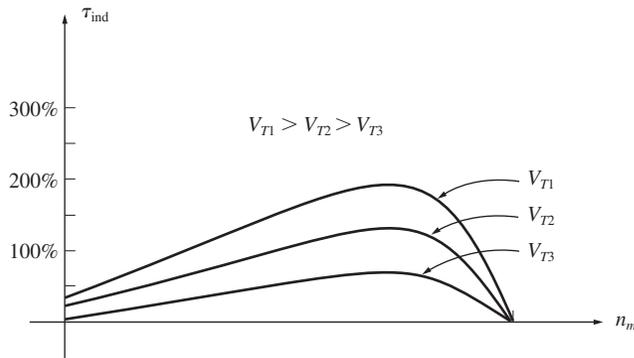


FIGURA 9-26 A característica de conjugado *versus* velocidade de um motor de indução de polos sombreados quando a tensão de terminal é variada. O aumento de V_T pode ser obtido elevando a tensão sobre o enrolamento inteiro ou, então, trocando a conexão passando-a para uma derivação inferior do enrolamento do estator.

Portanto, quanto menor for a fração de enrolamento que recebe a tensão de linha aplicada, maior será a tensão total no enrolamento inteiro e maior será a velocidade do motor para uma dada carga (veja a Figura 9-26).

Essa é a abordagem padrão utilizada para controlar a velocidade dos motores monofásicos em muitas aplicações de ventiladores e sopradores. Esse controle de velocidade tem a vantagem de ser bem barato, porque os únicos componentes necessários são derivações no enrolamento principal do motor e uma chave comum de polos múltiplos. Outra vantagem é que o autotransformador não consome potência do mesmo modo que ocorre com resistores em série.

9.5 O MODELO DE CIRCUITO DE UM MOTOR DE INDUÇÃO MONOFÁSICO

Como foi previamente descrito, um entendimento do conjugado induzido em um motor de indução monofásico pode ser conseguido através da teoria do duplo campo girante ou da teoria do campo cruzado dos motores monofásicos. Ambas as abordagens podem levar a um circuito equivalente do motor e a característica de conjugado *versus* velocidade também poderá ser obtida usando qualquer um dos métodos.

Esta seção restringe-se a desenvolver um circuito equivalente com base na teoria do duplo campo girante – na realidade, a apenas um caso especial dessa teoria. Desenvolveremos um circuito equivalente do *enrolamento principal* de um motor de indução quando ele está operando isolado. A técnica das componentes simétricas é necessária para analisar o caso de um motor monofásico com o enrolamento principal e o auxiliar presentes. Como as componentes simétricas estão além dos objetivos deste livro, esse caso não será discutido. Para uma análise mais detalhada dos motores de indução, veja a Referência 4.

A melhor maneira de iniciar a análise de um motor de indução monofásico é examinando o motor quando ele está parado. Nesse momento, o motor assemelha-se simplesmente a um transformador monofásico com o seu circuito secundário em curto-circuito. Assim, seu circuito equivalente é o de um transformador. Esse circuito equivalente está mostrado na Figura 9-27a. Nessa figura, R_1 e X_1 são a resistência e a reatância do enrolamento do estator. A reatância de magnetização é X_M e os valores referidos da resistência e da reatância do rotor são R_2 e X_2 . As perdas no núcleo da máquina não estão mostradas e serão combinadas com as perdas mecânicas e suplementares, como parte das perdas rotacionais do motor.

Agora, quando o motor está parado, recorde-se que o fluxo pulsante no entreferro do motor parado pode ser decomposto em dois campos magnéticos iguais e opostos dentro do motor. Como esses campos são de mesma intensidade, cada um contribui com partes iguais para as quedas de tensão resistiva e reativa no circuito do rotor. É possível dividir o circuito equivalente do rotor em duas seções, cada uma correspondendo aos efeitos de um dos campos magnéticos. O circuito equivalente do motor, incluindo a separação dos efeitos devidos aos campos magnéticos progressivo e retrógrado, está mostrado na Figura 9-27b.

Agora, suponha que o rotor do motor comece a girar por meio de um enrolamento auxiliar e que o enrolamento seja desconectado quando a velocidade de funcionamento do motor for atingida. Como foi deduzido no Capítulo 8, a resistência efetiva do rotor de um motor de indução depende do valor do movimento relativo existente entre os campos magnéticos do rotor e do estator. Entretanto, há dois campos magnéticos (progressivo e retrógrado) nesse motor, sendo que o movimento relativo é diferente para cada um deles.

Para o campo magnético *progressivo*, a diferença por unidade entre a velocidade do rotor e a velocidade do campo magnético é o escorregamento s , sendo o escorregamento definido da mesma forma que no motor de indução trifásico. Portanto, a resistência do rotor na parte do circuito associada com o campo magnético progressivo é $0,5R_2/s$.

O campo magnético progressivo gira na velocidade n_{sinc} e o campo magnético retrógrado gira na velocidade $-n_{\text{sinc}}$. Portanto, a diferença total de velocidade por

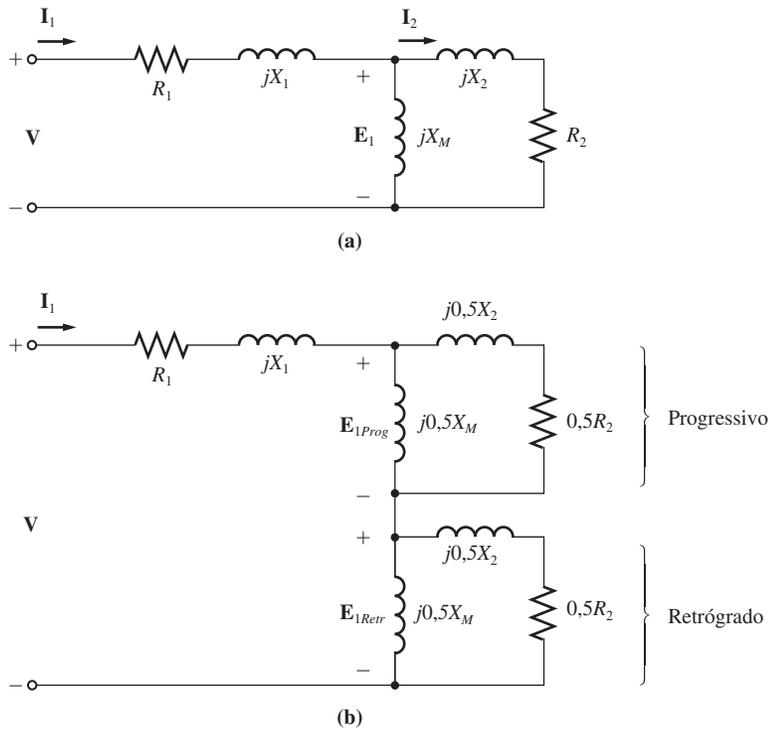


FIGURA 9-27
 (a) O circuito equivalente de um motor de indução monofásico com o rotor parado. Somente seu enrolamento principal está energizado. (b) O circuito equivalente em que os efeitos dos campos magnéticos progressivo e retrógrado foram separados.

unidade (com base em n_{sinc}) entre os campos magnéticos progressivo e retrógrado é 2. Como o rotor está girando com uma velocidade s menor do que o campo magnético progressivo, a diferença total de velocidade por unidade entre o rotor e o campo magnético retrógrado é $2 - s$. Portanto, a resistência efetiva do rotor na parte do circuito associada ao campo magnético retrógrado é $0,5R_2/(2 - s)$.

O circuito equivalente final do motor de indução está mostrado na Figura 9-28.

Análise de circuito com o circuito equivalente do motor de indução monofásico

O circuito equivalente do motor de indução monofásico da Figura 9-28 é similar ao circuito equivalente trifásico, exceto pelo fato de que estão presentes ambas as componentes progressiva e retrógrada de potência e conjugado. As mesmas relações genéricas de potência e conjugado que se aplicavam aos motores trifásicos também podem ser aplicadas às componentes progressiva e retrógrada do motor monofásico. A potência e o conjugado líquidos da máquina serão as *diferenças* entre as respectivas componentes progressivas e retrógradadas.

O diagrama do fluxo de potência de um motor de indução está repetido na Figura 9-29 para facilitar a consulta.

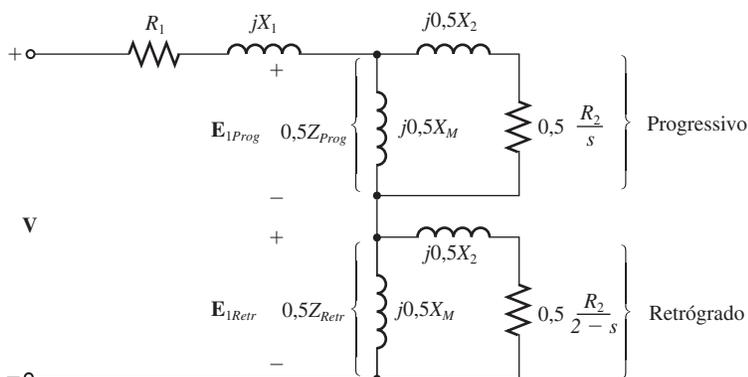


FIGURA 9-28
O circuito equivalente de um motor de indução monofásico girando apenas com o enrolamento principal energizado.

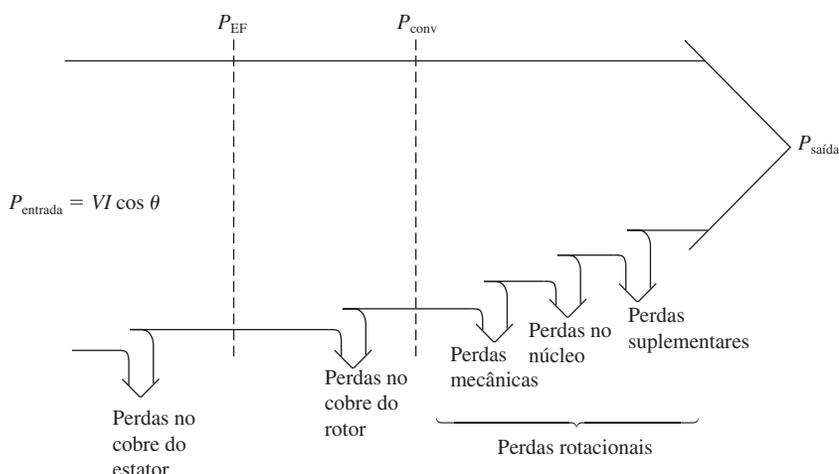


FIGURA 9-29
O diagrama de fluxo de potência de um motor de indução monofásico.

Para tornar mais simples o cálculo da corrente de entrada do motor, é costume definir as impedâncias Z_{Prog} e Z_{Retr} , em que Z_{Prog} é uma impedância única que equivale a todos os elementos de impedância do campo magnético progressivo e Z_{Retr} é uma impedância única que equivale a todos os elementos de impedância do campo magnético retrógrado (veja a Figura 9-30). Essas impedâncias são dadas por

$$Z_{Prog} = R_{Prog} + jX_{Prog} = \frac{(R_2/s + jX_2)(jX_M)}{(R_2/s + jX_2) + jX_M} \quad (9-5)$$

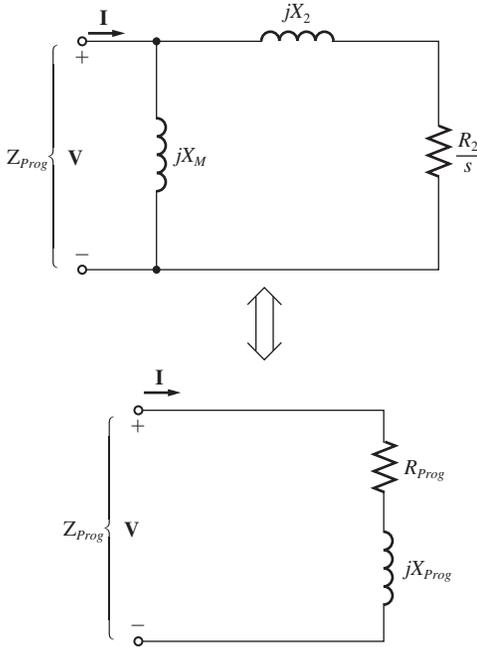


FIGURA 9-30
 Uma combinação em série de R_{Prog} e jX_{Prog} é o equivalente Thévenin dos elementos de impedância do campo magnético progressivo e, portanto, R_{Prog} deve consumir a mesma potência que R_2/s consumiria para uma dada corrente.

$$Z_{Retr} = R_{Retr} + jX_{Retr} = \frac{[R_2/(2 - s) + jX_2](jX_M)}{[R_2/(2 - s) + jX_2] + jX_M} \quad (9-6)$$

Em termos de Z_{Prog} e Z_{Retr} , a corrente que circula no enrolamento do estator do motor de indução é

$$I_1 = \frac{V}{R_1 + jX_1 + 0,5 Z_{Prog} + 0,5 Z_{Retr}} \quad (9-7)$$

A potência no entreferro por fase de um motor de indução trifásico é a potência consumida na resistência do circuito de rotor $0,5R_2/s$. De modo semelhante, a potência progressiva de entreferro de um motor de indução monofásico é a potência consumida por $0,5R_2/s$ e a potência retrógrada de entreferro do motor é a potência consumida por $0,5R_2/(2 - s)$. Portanto, a potência de entreferro do motor poderia ser calculada determinando primeiro as potências no resistor progressivo $0,5R_2/s$ e no resistor retrógrado $0,5R_2/(2 - s)$. A seguir, calcula-se a diferença entre elas.

A parte mais difícil desse cálculo é a determinação em separado das correntes que circulam nos dois resistores. Felizmente, é possível simplificar esse cálculo. Observe que, entre os elementos de circuito que compõem a impedância equivalente Z_{Prog} , o único resistor presente é o R_2/s . Como Z_{Prog} é equivalente àquele circuito, qualquer potência consumida por Z_{Prog} deve ser consumida também pelo circuito original e, como R_2/s é o único resistor no circuito original, seu consumo de potência deve ser igual ao da impedância Z_{Prog} . Portanto, a potência de entreferro para o campo magnético progressivo pode ser expressa como

$$P_{EF, Progr} = I_1^2(0,5 R_{Progr}) \quad (9-8)$$

De modo similar, a potência de entreferro para o campo magnético retrógrado pode ser expressa como

$$P_{EF, Retr} = I_1^2(0,5 R_{Retr}) \quad (9-9)$$

A vantagem dessas duas equações é que apenas uma corrente I_1 precisa ser calculada para determinar ambas as potências.

A potência de entreferro total em um motor de indução monofásico é, portanto,

$$P_{EF} = P_{EF, Progr} - P_{EF, Retr} \quad (9-10)$$

O conjugado induzido em um motor de indução trifásico pode ser obtido da equação

$$\tau_{ind} = \frac{P_{EF}}{\omega_{sinc}} \quad (9-11)$$

em que P_{EF} é a potência líquida de entreferro dada pela Equação (9-10)

As perdas no cobre do rotor podem ser obtidas como a soma das perdas no cobre do rotor devido ao campo magnético progressivo e as perdas no cobre do rotor devido ao campo magnético retrógrado.

$$P_{PCR} = P_{PCR, Progr} + P_{PCR, Retr} \quad (9-12)$$

As perdas no cobre do rotor de um motor de indução trifásico eram iguais ao movimento relativo por unidade entre os campos do rotor e do estator (o escorregamento) vezes a potência de entreferro da máquina. De modo similar, as perdas progressivas no cobre do rotor de um motor de indução monofásico são dadas por

$$P_{PCR, Progr} = sP_{EF, Progr} \quad (9-13)$$

e as perdas retrógradas no cobre do rotor do motor são dadas por

$$P_{PCR, Retr} = sP_{EF, Retr} \quad (9-14)$$

Como essas duas perdas de potência do rotor ocorrem em frequências diferentes, as perdas totais de potência no rotor são simplesmente a sua soma.

A potência convertida da forma elétrica para a forma mecânica em um motor de indução monofásico é dada pela mesma equação de P_{conv} do motor de indução trifásico. Essa equação é

$$P_{conv} = \tau_{ind}\omega_m \quad (9-15)$$

Como $\omega_m = (1 - s)\omega_{sinc}$, essa equação também pode ser expressa como

$$P_{conv} = \tau_{ind}(1 - s)\omega_m \quad (9-16)$$

Da Equação (9-11), $P_{EF} = \tau_{ind}\omega_{sinc}$, temos que P_{conv} pode ser expressa como

$$P_{conv} = (1 - s) P_{EF} \quad (9-17)$$

Como no caso do motor de indução trifásico, a potência de saída no eixo não é igual a P_{conv} , porque as perdas rotacionais também devem ser subtraídas. No modelo de motor de indução monofásico usado aqui, as perdas no núcleo, as mecânicas e as perdas suplementares devem ser subtraídas de P_{conv} para obter $P_{saída}$.

EXEMPLO 9-1 Um motor de indução de fase dividida, 1/3 HP, 110 V, 60 Hz e seis polos, tem as seguintes impedâncias:

$$\begin{aligned} R_1 &= 1,52 \, \Omega & X_1 &= 2,10 \, \Omega & X_M &= 58,2 \, \Omega \\ R_2 &= 3,13 \, \Omega & X_2 &= 1,56 \, \Omega \end{aligned}$$

As perdas no núcleo desse motor são 35 W, ao passo que as perdas mecânicas por atrito e ventilação e as suplementares totalizam 16 W. O motor está operando em tensão e frequência nominais com o seu enrolamento de partida em aberto e o escorregamento do motor é de 5 por cento. Encontre as seguintes grandezas nessas condições:

- (a) A velocidade em rotações por minuto
- (b) A corrente do estator em ampères
- (c) O fator de potência do estator
- (d) P_{entrada}
- (e) P_{EF}
- (f) P_{conv}
- (g) τ_{ind}
- (h) $P_{\text{saída}}$
- (i) τ_{carga}
- (j) Eficiência

Solução

As impedâncias progressiva e retrógrada desse motor para um escorregamento de 5% são

$$\begin{aligned} Z_{\text{Prog}} &= R_{\text{Prog}} + jX_{\text{Prog}} = \frac{(R_2/s + jX_2)(jX_M)}{(R_2/s + jX_2) + jX_M} & (9-5) \\ &= \frac{(3,13 \, \Omega/0,05 + j1,56 \, \Omega)(j58,2 \, \Omega)}{(3,13 \, \Omega/0,05 + j1,56 \, \Omega) + j58,2 \, \Omega} \\ &= \frac{(62,6 \angle 1,43^\circ \, \Omega)(j58,2 \, \Omega)}{(62,6 \, \Omega + j1,56 \, \Omega) + j58,2 \, \Omega} \\ &= 39,9 \angle 50,5^\circ \, \Omega = 25,4 + j30,7 \, \Omega \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} Z_{\text{Retr}} &= R_{\text{Retr}} + jX_{\text{Retr}} = \frac{[R_2/(2 - s) + jX_2](jX_M)}{[R_2/(2 - s) + jX_2] + jX_M} & (9-6) \\ &= \frac{(3,13 \, \Omega/1,95 + j1,56 \, \Omega)(j58,2 \, \Omega)}{(3,13 \, \Omega/1,95 + j1,56 \, \Omega) + j58,2 \, \Omega} \\ &= \frac{(2,24 \angle 44,2^\circ \, \Omega)(j58,2 \, \Omega)}{(1,61 \, \Omega + j1,56 \, \Omega) + j58,2 \, \Omega} \\ &= 2,18 \angle 45,9^\circ \, \Omega = 1,51 + j1,56 \, \Omega \end{aligned}$$

Esses valores serão usados para determinar a corrente, a potência e o conjugado do motor.

- (a) A velocidade síncrona do motor é

$$n_{\text{sinc}} = \frac{120f_{se}}{P} = \frac{120(60 \text{ Hz})}{6 \text{ polos}} = 1200 \text{ rpm}$$

Como o motor está operando com um escorregamento de 5%, sua velocidade mecânica é

$$n_m = (1 - s)n_{\text{sinc}}$$

$$n_m = (1 - 0,05)(1200 \text{ rpm}) = 1140 \text{ rpm}$$

(b) A corrente de estator desse motor é

$$\begin{aligned} \mathbf{I}_1 &= \frac{\mathbf{V}}{R_1 + jX_1 + 0,5Z_{Prog} + 0,5Z_{Retr}} & (9-7) \\ &= \frac{110\angle 0^\circ \text{ V}}{1,52 \Omega + j2,10 \Omega + 0,5(25,4 \Omega + j30,7 \Omega) + 0,5(1,51 \Omega + j1,56 \Omega)} \\ &= \frac{110\angle 0^\circ \text{ V}}{14,98 \Omega + j18,23 \Omega} = \frac{110\angle 0^\circ \text{ V}}{23,6\angle 50,6^\circ \Omega} = 4,66\angle -50,6^\circ \text{ A} \end{aligned}$$

(c) O fator de potência do motor é

$$\text{FP} = \cos(-50,6^\circ) = 0,635 \text{ atrasado}$$

(d) A potência de entrada desse motor é

$$\begin{aligned} P_{\text{entrada}} &= VI \cos \theta \\ &= (110 \text{ V})(4,66 \text{ A})(0,635) = 325 \text{ W} \end{aligned}$$

(e) A potência progressiva de entreferro é

$$\begin{aligned} P_{\text{EF, Progr}} &= I_1^2(0,5 R_{\text{Prog}}) & (9-8) \\ &= (4,66 \text{ A})^2(12,7 \Omega) = 275,8 \text{ W} \end{aligned}$$

e a potência retrógrada de entreferro é

$$\begin{aligned} P_{\text{EF, Retr}} &= I_1^2(0,5 R_{\text{Retr}}) & (9-9) \\ &= (4,66 \text{ A})^2(0,755 \Omega) = 16,4 \text{ W} \end{aligned}$$

Portanto, a potência de entreferro total do motor é

$$\begin{aligned} P_{\text{EF}} &= P_{\text{EF, Progr}} - P_{\text{EF, Retr}} & (9-10) \\ &= 275,8 \text{ W} - 16,4 \text{ W} = 259,4 \text{ W} \end{aligned}$$

(f) A potência convertida da forma elétrica para a mecânica é

$$\begin{aligned} P_{\text{conv}} &= (1 - s) P_{\text{EF}} & (9-17) \\ &= (1 - 0,05)(259,4 \text{ W}) = 246 \text{ W} \end{aligned}$$

(g) O conjugado induzido no motor é dado por

$$\begin{aligned} \tau_{\text{ind}} &= \frac{P_{\text{EF}}}{\omega_{\text{sinc}}} \\ &= \frac{259,4 \text{ W}}{(1200 \text{ rotações/min})(1 \text{ min}/60 \text{ s})(2\pi \text{ rad/rotação})} = 2,06 \text{ N} \cdot \text{m} \end{aligned}$$

(h) A potência de saída é dada por

$$\begin{aligned} P_{\text{saída}} &= P_{\text{conv}} - P_{\text{rot}} = P_{\text{conv}} - P_{\text{núcleo}} - P_{\text{mec}} - P_{\text{suplem}} \\ &= 246 \text{ W} - 35 \text{ W} - 16 \text{ W} = 195 \text{ W} \end{aligned}$$

(i) O conjugado de carga do motor é dado por

$$\tau_{\text{carga}} = \frac{P_{\text{saída}}}{\omega_m}$$

$$= \frac{195 \text{ W}}{(1140 \text{ rotações/min})(1 \text{ min}/60 \text{ s})(2\pi \text{ rad/rotação})} = 1,63 \text{ N} \cdot \text{m}$$

(j) Finalmente, a eficiência do motor nessas condições é

$$\eta = \frac{P_{saída}}{P_{entrada}} \times 100\% = \frac{195 \text{ W}}{325 \text{ W}} \times 100\% = 60\%$$

9.6 OUTROS TIPOS DE MOTORES

Dois outros tipos de motores – motores de relutância e motores de histerese – são usados em certas aplicações de propósitos especiais. Em relação aos motores que foram discutidos anteriormente, eles são diferentes em relação à forma construtiva do rotor, mas usam a mesma estrutura de estator. Como os motores de indução, eles podem ser construídos com estatores monofásico ou trifásico. Um terceiro tipo de motor para aplicações especiais é o motor de passo. Um motor de passo requer um estator de múltiplos polos, mas não necessita uma fonte de potência trifásica. O último motor para aplicações especiais a ser discutido é o motor CC sem escovas, o qual, como o nome sugere, funciona com uma fonte de potência CC.

Motores de relutância

Um *motor de relutância* é um motor que usa conjugado de relutância para o seu funcionamento. O conjugado de relutância é o conjugado induzido em um objeto de ferro (como um alfinete) na presença de um campo magnético externo, levando o objeto a se alinhar com o campo magnético externo. Esse conjugado ocorre porque o campo externo induz um campo magnético interno no ferro do objeto. Daí surge um conjugado entre os dois campos que faz girar o objeto até que ele esteja alinhado com o campo externo. Para que um conjugado de relutância seja produzido no objeto, ele deve se orientar segundo eixos cujos ângulos correspondem aos ângulos entre polos adjacentes do campo magnético externo.

Um diagrama esquemático simples de um motor de relutância de dois polos está mostrado na Figura 9-31. Pode-se mostrar que o conjugado aplicado ao rotor desse motor é proporcional a $\sin 2\delta$, em que δ é o ângulo elétrico entre os campos magnéticos do rotor e do estator. Portanto, o conjugado de relutância de motor é máximo quando o ângulo entre os campos magnéticos do rotor e do estator é 45° .

Um motor de relutância simples do tipo mostrado na Figura 9-31 é um *motor síncrono*. Nesse motor, o rotor acompanhará perfeitamente o campo magnético do estator enquanto o conjugado máximo do motor não for excedido. Como um motor normal síncrono, ele não tem conjugado de partida e não arrancará por si próprio.

Um *motor de relutância com partida própria*, que irá operar na velocidade síncrona até que seu conjugado máximo de relutância seja excedido, pode ser construído modificando o rotor de um motor de indução, como está mostrado na Figura 9-32. Nessa figura, o rotor tem polos salientes para funcionar em regime permanente como um motor de relutância e também tem enrolamentos amortecedores de partida. O estator desse motor pode ser de estrutura monofásica ou trifásica. A característica de conjugado *versus* velocidade desse motor, que é algumas vezes denominado *motor de indução síncrono*, está mostrada na Figura 9-33.

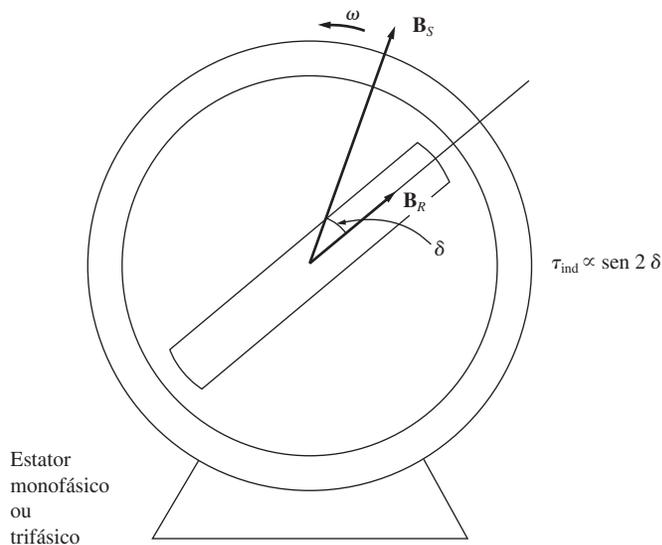


FIGURA 9-31
O conceito básico de um motor de relutância.

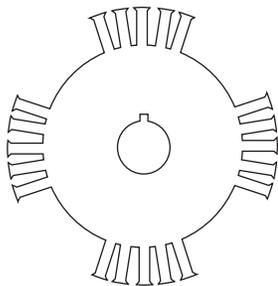


FIGURA 9-32
A estrutura do rotor de um motor de relutância “de indução síncrono” ou com partida própria.

Uma variação interessante da ideia de motor de relutância é o motor de nome comercial Synchrospeed, que é fabricado nos Estados Unidos pela MagneTek, Inc. O rotor desse motor está mostrado na Figura 9-34. Ele utiliza “guias de fluxo” para aumentar o acoplamento entre faces polares adjacentes e, portanto, para aumentar o conjugado máximo de relutância do motor. Com essas guias de fluxo, o conjugado máximo de relutância é aumentado para aproximadamente 150% do conjugado nominal, em comparação com o pouco mais de 100% de um motor de relutância convencional.

Motores de histerese

Outro motor de aplicação especial emprega o fenômeno da histerese para produzir um conjugado mecânico. O rotor de um motor de histerese é um cilindro com uma superfície suave de material magnético sem dentes, protuberâncias ou enrolamentos. O estator do motor pode ser monofásico ou trifásico. No entanto, se for monofásico, deve-se usar um capacitor permanente com um enrolamento auxiliar para produzir

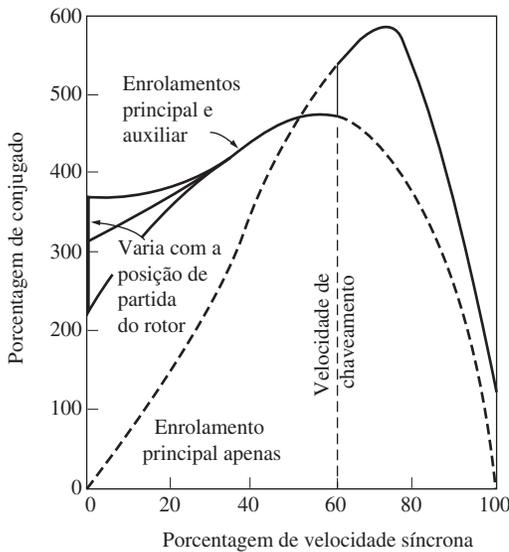


FIGURA 9-33
A característica de conjugado *versus* velocidade de um motor monofásico de relutância com partida própria.

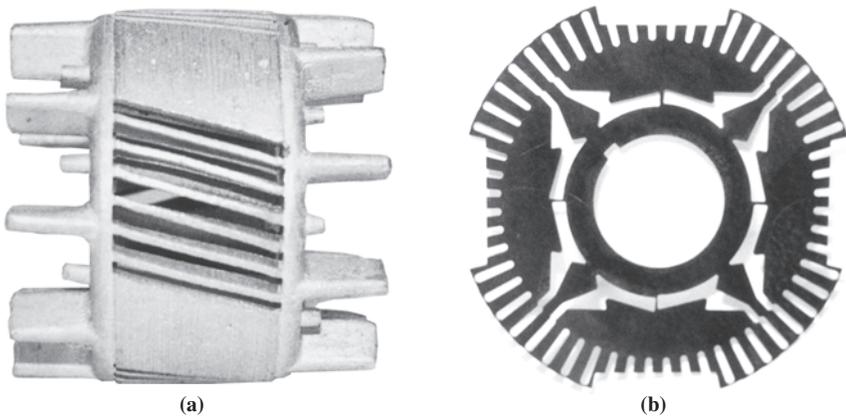


FIGURA 9-34
(a) Peça fundida de alumínio do rotor de um motor Synchrospeed. (b) Uma chapa laminada do motor. Observe as guias de fluxo que conectam os polos adjacentes. Essas guias aumentam o conjugado de relutância do motor (*Cortesia de MagneTek, Inc.*).

um campo magnético tão suave quanto possível, porque isso reduz grandemente as perdas do motor.

A Figura 9-35 mostra o funcionamento básico de um motor de histerese. Quando uma corrente trifásica (ou monofásica, com enrolamento auxiliar) é aplicada ao estator do motor, um campo magnético girante aparece dentro da máquina. Esse campo magnético girante magnetiza o metal do rotor induzindo polos dentro dele.

Quando o motor está operando abaixo da velocidade síncrona, há duas fontes de conjugado dentro dele. A maior parte do conjugado é produzida por histerese. Quando o campo magnético varre a superfície do rotor, o fluxo do rotor não pode acom-

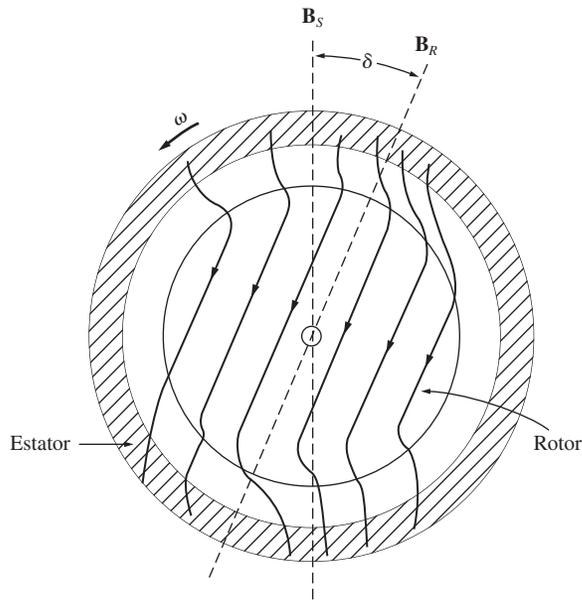


FIGURA 9-35

A construção de um motor de histerese. A componente principal de conjugado deste motor é proporcional ao ângulo entre os campos magnéticos do rotor e do estator.

panhá-lo exatamente, porque o metal do rotor tem uma perda elevada por histerese. Quanto maiores forem as perdas intrínsecas por histerese do material do rotor, maior será o ângulo de atraso do campo magnético do rotor em relação ao campo magnético do estator. Como os campos magnéticos do rotor e do estator estão em ângulos diferentes, um conjugado finito será produzido no motor. Além disso, o campo magnético do estator induz correntes parasitas no rotor e essas correntes produzem um campo magnético próprio, incrementando ainda mais o conjugado do rotor. Quanto maior for o movimento relativo entre os campos magnéticos do rotor e do estator, maiores serão as correntes parasitas e os respectivos conjugados.

Quando o motor alcança a velocidade síncrona, o fluxo do estator cessa de varrer o rotor, que passa a se comportar como um ímã permanente. Nesse momento, o conjugado induzido no motor é proporcional ao ângulo entre os campos magnéticos do rotor e do estator. O valor máximo desse ângulo é determinado pela histerese do rotor.

A característica de conjugado *versus* velocidade de um motor de histerese está mostrada na Figura 9-36. Como o valor da histerese em um rotor em particular é uma função apenas da densidade de fluxo do estator e do material de que é feito, o conjugado de histerese do motor é aproximadamente constante para qualquer velocidade entre zero e n_{sinc} . O conjugado devido à corrente parasita é aproximadamente proporcional ao escorregamento do motor. Esses dois fatos em conjunto são responsáveis pela forma da característica de conjugado *versus* velocidade do motor de histerese.

Como o conjugado de um motor de histerese em qualquer velocidade inferior à síncrona é maior do que o seu conjugado síncrono máximo, um motor de histerese

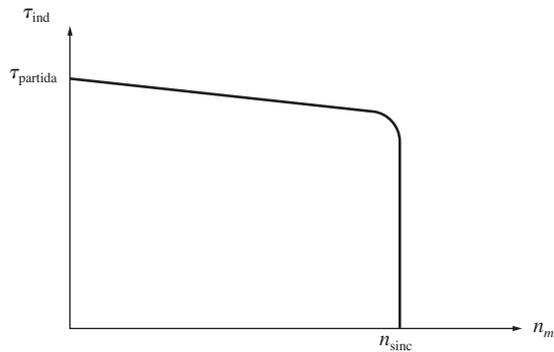


FIGURA 9-36
A característica de conjugado *versus* velocidade de um motor de histerese.

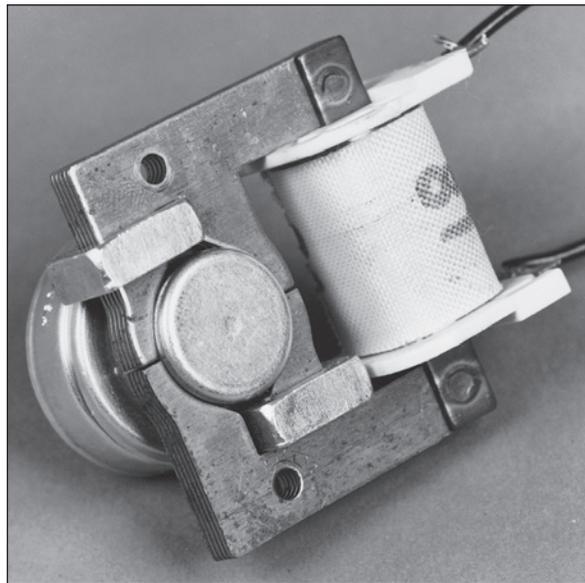


FIGURA 9-37
Um pequeno motor de histerese com um estator de polos sombreados, adequado para um relógio elétrico. Observe os polos sombreados do estator. (*Stephen J. Chapman*)

é capaz de acelerar qualquer carga que ele consiga manter girando em funcionamento normal.

Um motor de histerese muito pequeno pode ser construído com um estator de polos sombreados, obtendo-se assim um motor síncrono pequeno de baixa potência e partida própria. Esse motor está mostrado na Figura 9-37; é utilizado comumente como mecanismo para acionar relógios elétricos. Portanto, um relógio como esse estará sincronizado com a frequência de linha do sistema de potência e o relógio resultante será tão exato (ou inexato) quanto a frequência do sistema de potência à qual ele está conectado.

Motores de passo

Um *motor de passo* é um tipo especial de motor síncrono que é projetado para girar um número específico de graus a cada pulso elétrico recebido em sua unidade de controle. Passos típicos têm $7,5^\circ$ ou 15° por pulso. Esses motores são usados em muitos sistemas de controle, porque a posição de um eixo ou de outros mecanismos pode ser controlada precisamente com eles.

Um motor de passo simples e a unidade de controle associada estão mostrados na Figura 9-38. Para compreender o funcionamento do motor de passo, examine a Figura 9-39. Essa figura mostra um estator trifásico de dois polos com um rotor de ímã permanente. Se uma tensão CC for aplicada à fase *a* do estator e nenhuma tensão for aplicada às fases *b* e *c*, então um conjugado será induzido no rotor, fazendo com que ele se alinhe com o campo magnético \mathbf{B}_s do estator, como está mostrado na Figura 9-39b.

Agora, assuma que a fase *a* é desligada e que uma tensão CC negativa é aplicada à fase *c*. O novo campo magnético do estator será girado de 60° em relação ao campo magnético anterior e o rotor do motor irá girar seguindo-o. Continuando com esse padrão de pulsos, é possível construir uma tabela que mostra a posição do rotor em função da tensão aplicada ao estator do motor. Se a tensão produzida pela unidade de controle mudar a cada pulso de entrada na ordem mostrada na Tabela 9-1, então o motor de passo avançará 60° a cada pulso de entrada.

Poderemos facilmente construir um motor de passo com um tamanho de passo menor se aumentarmos o número de polos do motor. A partir da Equação (3-31), temos que o número de graus mecânicos correspondentes a um dado número de graus elétricos é

$$\theta_m = \frac{2}{P} \theta_e \quad (9-18)$$

Como cada passo da Tabela 9-1 corresponde a 60 graus elétricos, o número de graus mecânicos deslocados por passo diminui com o aumento do número de polos. Por exemplo, se o motor de passo tiver oito polos, o ângulo mecânico do eixo do motor irá girar 15° a cada passo.

Se usarmos a Equação (9-18), a velocidade de um motor de passo poderá ser relacionada com o número de pulsos que chegam à sua unidade de controle por unidade de tempo. A Equação (9-18) dá o ângulo mecânico de um motor de passo em função do ângulo elétrico. Se calcularmos a derivada de ambos os lados dessa equação em relação ao tempo, teremos uma relação entre as velocidades de rotação elétrica e mecânica do motor:

$$\omega_m = \frac{2}{P} \omega_e \quad (9-19a)$$

$$\text{ou} \quad n_m = \frac{2}{P} n_e \quad (9-19b)$$

Como há seis pulsos de entrada por cada rotação elétrica, a relação entre a velocidade do motor em rotações por minuto e o número de pulsos por minuto torna-se

$$\boxed{n_m = \frac{1}{3P} n_{\text{pulsos}}} \quad (9-20)$$

em que n_{pulsos} é o número de pulsos por minuto.

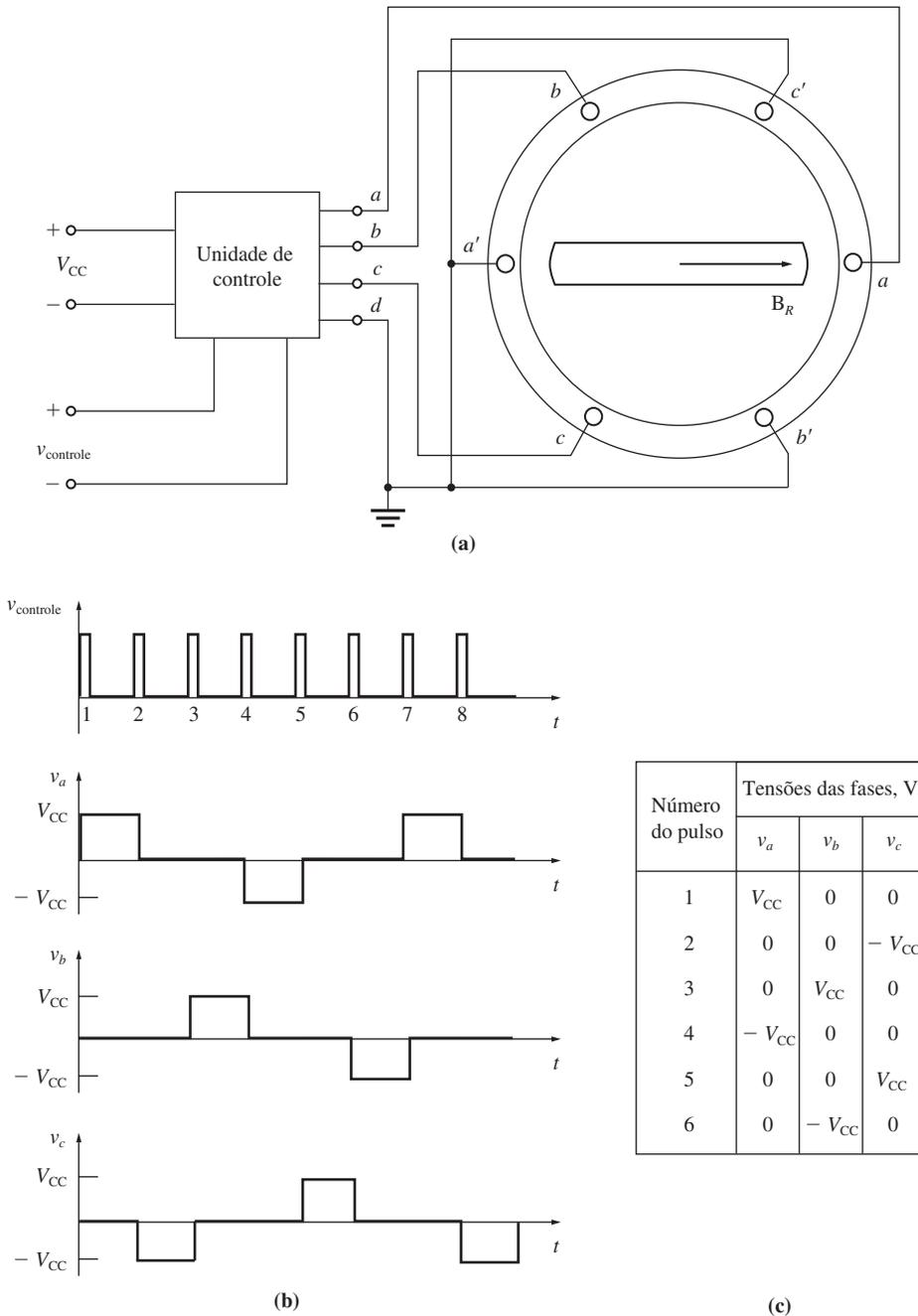


FIGURA 9-38

(a) Um motor de passo trifásico simples e sua unidade de controle. As entradas da unidade de controle consistem em uma fonte de tensão CC e um sinal de controle composto por um trem de pulsos. (b) Um diagrama da tensão de saída da unidade de controle quando está sendo aplicada uma série de pulsos de controle em sua entrada. (c) Uma tabela mostrando a tensão de saída da unidade de controle em função do número do pulso.

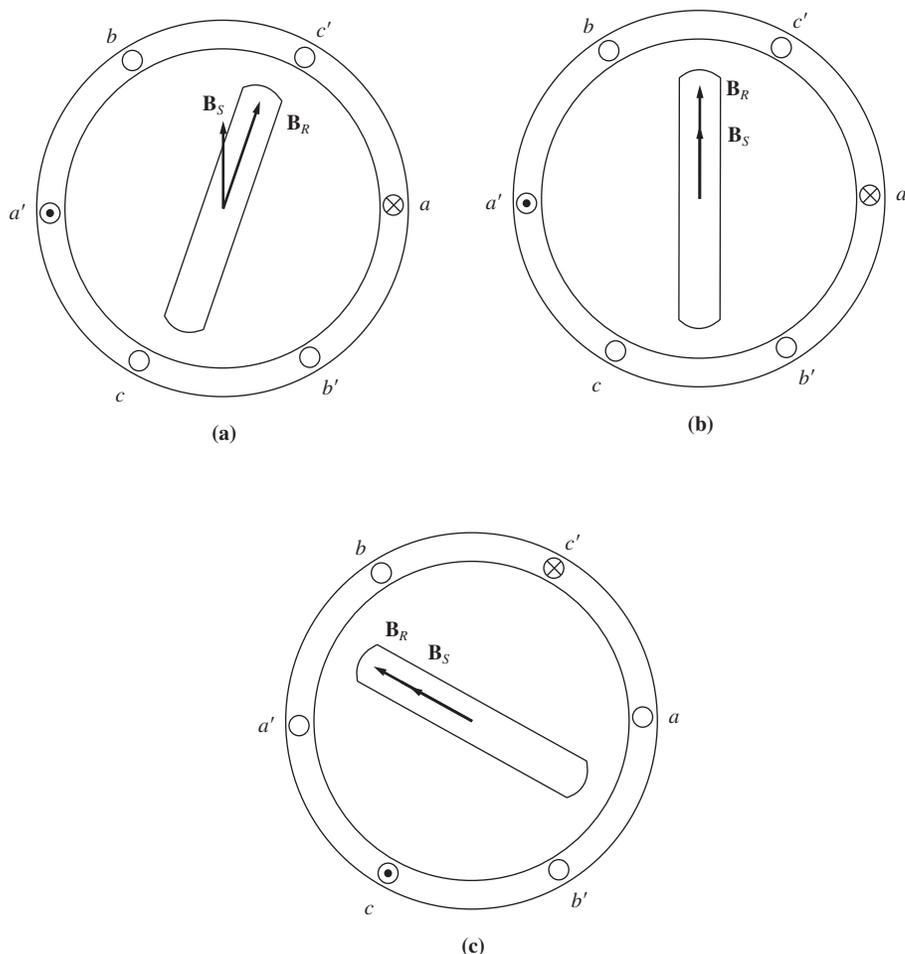


FIGURA 9-39

Funcionamento de um motor de passo. (a) Uma tensão V é aplicada à fase a do estator, fazendo com que circule uma corrente na fase a e que seja produzido um campo magnético \mathbf{B}_S no estator. A interação de \mathbf{B}_R e \mathbf{B}_S produz um conjugado anti-horário no rotor. (b) Quando o rotor alinha-se com o campo magnético do estator, o conjugado líquido cai a zero. (c) Uma tensão $-V$ é aplicada à fase c do estator, fazendo com que circule uma corrente na fase c e que seja produzido um campo magnético \mathbf{B}_S no estator. A interação de \mathbf{B}_R e \mathbf{B}_S produz um conjugado anti-horário no rotor, fazendo com que o rotor alinhe-se com a nova posição do campo.

Há dois tipos básicos de motores de passo, sendo diferentes apenas na construção do rotor: *tipo de ímã permanente* e *tipo de relutância*. O motor de passo do tipo de ímã permanente tem um rotor de ímã permanente, ao passo que o motor de passo do tipo de relutância tem um rotor ferromagnético que não é um ímã permanente. (O rotor do motor de relutância descrito antes nesta seção é do tipo de relutância.) Em geral, o motor de passo do tipo de ímã permanente pode produzir mais conjugado do que o motor de passo do tipo de relutância, porque o conjugado do motor de ímã

TABELA 9-1
Posição do rotor em função da tensão, em um motor de passo de dois polos

Número do pulso de entrada	Tensões das fases			Posição do rotor
	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>	
1	V	0	0	0°
2	0	0	-V	60°
3	0	V	0	120°
4	-V	0	0	180°
5	0	0	V	240°
6	0	-V	0	300°

permanente é devido ao campo magnético permanente do rotor e também devido aos efeitos de relutância.

Os motores de passo do tipo de relutância são construídos frequentemente com um enrolamento de estator de quatro fases no lugar do enrolamento trifásico descrito anteriormente. Um enrolamento de estator de quatro fases reduz os passos entre os pulsos de 60 para 45 graus elétricos. Como foi mencionado anteriormente, o conjugado de um motor de relutância varia segundo $\text{sen } 2\delta$, de modo que o conjugado de relutância entre os passos será máximo para um ângulo de 45°. Portanto, um dado motor de passo do tipo de relutância pode produzir mais conjugado com um enrolamento de estator de quatro fases do que com um enrolamento de estator trifásico.

A Equação (9-20) pode ser generalizada e aplicada a todos os motores de passo, independentemente do número de fases dos seus enrolamentos de estator. Em geral, se o estator de um motor tiver N fases, então $2N$ pulsos serão necessários para cada rotação elétrica do motor. Portanto, a relação entre a velocidade do motor em rotações por minuto e o número de pulsos por minuto torna-se

$$n_m = \frac{1}{NP} n_{\text{pulsos}} \tag{9-21}$$

Os motores de passo são muito úteis em sistemas de controle e posicionamento porque o computador que executa o controle pode conhecer tanto a *velocidade* quanto a *posição* exatas do motor de passo, sem a necessidade de receber informações vindas do eixo do motor. Por exemplo, se um sistema de controle enviar 1200 pulsos por minuto para o motor de passo de dois polos mostrado na Figura 9-38, então a velocidade do motor será exatamente

$$\begin{aligned} n_m &= \frac{1}{3P} n_{\text{pulsos}} && (9-20) \\ &= \frac{1}{3(2 \text{ polos})} (1200 \text{ pulsos/min}) \\ &= 200 \text{ rpm} \end{aligned}$$

Além disso, se a posição inicial do eixo for conhecida, então o computador poderá determinar o ângulo exato do eixo do rotor em qualquer tempo futuro, simplesmente contando o número total de pulsos que ele enviou à unidade de controle do motor de passo.

EXEMPLO 9-2 Em uma dada aplicação, um motor de passo trifásico de ímã permanente deve ser capaz de controlar a posição de um eixo em passos de $7,5^\circ$ e deve ser capaz de operar com velocidades de até 300 rpm.

- (a) Quanto polos esse motor deve ter?
 (b) Com que velocidade os pulsos de controle deverão ser recebidos pela unidade de controle do motor, se ele operar a 300 rpm?

Solução

- (a) Em um motor de passo trifásico, cada pulso faz a posição do rotor avançar 60 graus elétricos. Isso corresponde a 7,5 graus mecânicos. Isolando P na Equação (9-18), obtém-se

$$P = 2 \frac{\theta_e}{\theta_m} = 2 \left(\frac{60^\circ}{7,5^\circ} \right) = 16 \text{ polos}$$

- (b) Isolando n_{pulsos} na Equação (9-21), obtém-se

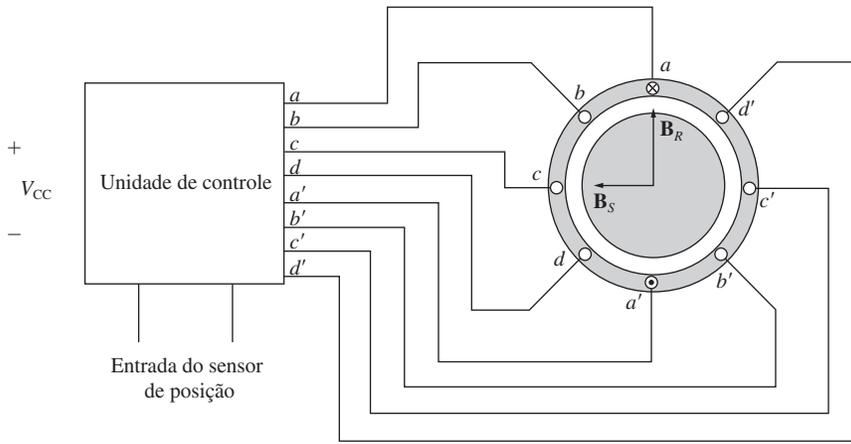
$$\begin{aligned} n_{\text{pulsos}} &= NPn_m \\ &= (3 \text{ fases})(16 \text{ polos})(300 \text{ rpm}) \\ &= 240 \text{ pulsos/s} \end{aligned}$$

Motores CC sem escovas

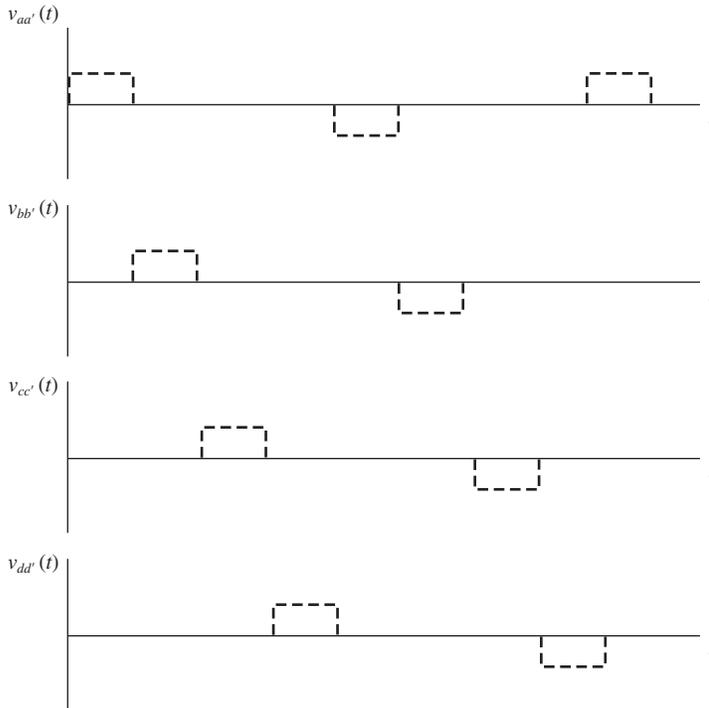
Os motores CC convencionais têm sido usados tradicionalmente em aplicações nas quais as fontes de tensão CC estão disponíveis, como em aeronaves e automóveis. Entretanto, pequenos motores CC desses tipos apresentam diversas desvantagens. A principal delas é o faiscamento e o desgaste excessivos das escovas. Motores CC, de pequeno porte e velozes, são pequenos demais para comportarem enrolamentos de compensação e interpolos, de modo que a reação de armadura e os efeitos $L di/dt$ tendem a produzir faiscamento em suas escovas de comutação. Além disso, a elevada velocidade de rotação desses motores causa um desgaste aumentado das escovas e requer manutenção regular a cada poucos milhares de horas. Se os motores forem usados em um ambiente de baixa pressão atmosférica (como uma aeronave voando em altitudes elevadas), então o desgaste das escovas poderá ser tão intenso que as escovas deverão ser substituídas com menos de uma hora de operação!

Em algumas aplicações, a manutenção regular exigida pelas escovas desses motores CC pode ser inaceitável. Considere, por exemplo, um motor CC de um coração artificial – a manutenção regular exigiria a abertura do tórax do paciente. Em outras aplicações, as faíscas das escovas podem criar um risco de explosão, ou ruído inaceitável de radiofrequência. Para todos esses casos, há necessidade de um motor CC pequeno e veloz que seja altamente confiável e que tenha baixo ruído e vida útil longa.

Nos últimos 25 anos, foram desenvolvidos motores desse tipo pela combinação de um circuito eletrônico de chaveamento de estado sólido e de um pequeno motor especial, muito semelhante a um motor de passo de ímã permanente e que tem um sensor para determinar a posição do rotor. Esses motores são denominados *motores CC sem escovas*, porque operam com uma fonte de potência CC, mas não têm comutadores nem escovas. Um diagrama de um pequeno motor CC sem escovas está mostrado na Figura 9-40 e uma fotografia de um motor CC sem escovas típico está mostrada na Figura 9-41. O rotor é similar a um motor de passo de ímã permanente, exceto pelo fato de que os polos não são salientes. O estator pode ter três ou mais fases (no exemplo mostrado na Figura 9-40, há quatro fases).



(a)



(b)

FIGURA 9-40

(a) Um motor CC sem escovas simples e sua unidade de controle. As entradas da unidade de controle consistem em uma fonte de potência e em um sinal proporcional à posição atual do rotor. (b) As tensões aplicadas às bobinas do estator.

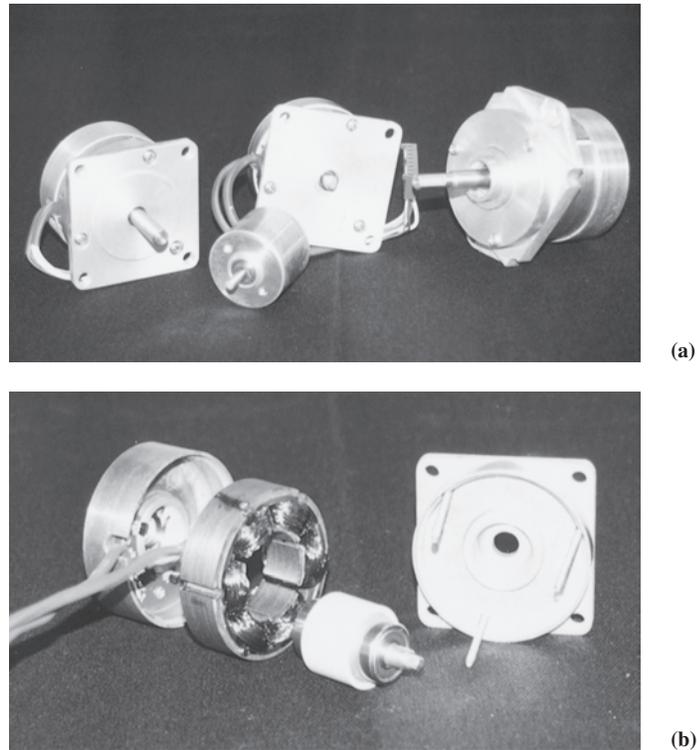


FIGURA 9-41

(a) Motores sem escovas típicos. (b) Vista explodida mostrando o rotor de ímã permanente e um estator trifásico (6 polos). (Cortesia de Carson Technologies, Inc.)

Os componentes básicos de um motor CC sem escovas são

1. Um rotor de ímã permanente
2. Um estator com enrolamento de três, quatro ou mais fases
3. Um sensor de posição do rotor
4. Um circuito eletrônico para controlar as fases do enrolamento de estator

Um motor CC sem escovas opera pela ativação de uma bobina de estator de cada vez, com uma tensão CC constante. Quando uma bobina é energizada, ela produz um campo magnético de estator \mathbf{B}_S , que por sua vez induz um conjugado no rotor que é dado por

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

Isso tende a alinhar o rotor com o campo magnético do estator. No instante mostrado na Figura 9-40a, o campo magnético \mathbf{B}_S do estator aponta para a esquerda, ao passo que o campo magnético \mathbf{B}_R do rotor aponta para cima, produzindo um conjugado anti-horário no rotor. Como resultado, o rotor irá girar para a esquerda.

Se uma bobina a permanecesse energizada o tempo todo, o rotor giraria até que os dois campos magnéticos estivessem alinhados e então pararia, exatamente como

um motor de passo. A chave do funcionamento de um motor CC sem escovas é que ele tem um *sensor de posição*, de modo que o circuito de controle sabe quando o rotor está quase alinhado com o campo magnético do estator. Nesse momento, a bobina *a* é desligada e a bobina *b* é ligada, fazendo com que o rotor volte a ter novamente um conjugado anti-horário e continue a girar. Esse processo continua indefinidamente com as bobinas sendo ligadas na ordem *a, b, c, d, -a, -b, -c, -d, etc.*, de modo que o motor gira continuamente.

A eletrônica do circuito de controle pode ser usada para controlar a velocidade e o sentido de rotação do motor. O resultado líquido de um motor construído desse modo é que ele opera a partir de uma fonte de potência CC, com controle total sobre a velocidade e o sentido de rotação.

Os motores CC sem escovas estão disponíveis apenas em tamanhos pequenos, até em torno de 20 W, apresentando diversas vantagens nessa faixa de potências disponíveis. Algumas das vantagens principais são:

1. Relativa alta eficiência.
2. Longa vida e elevada confiabilidade.
3. Manutenção mínima ou inexistente.
4. Ruído de radiofrequência (RF) muito baixo, quando comparado com o de um motor CC com escovas.
5. Velocidades muito elevadas são possíveis (acima de 50.000 rpm).

A principal desvantagem é que um motor CC sem escovas é mais caro que um motor CC com escovas comparável.

9.7 SÍNTESE DO CAPÍTULO

Os motores CA descritos nos capítulos anteriores necessitavam de potência elétrica trifásica para funcionar. Entretanto, em muitas residências e empresas de pequeno porte, as fontes de energia elétrica são somente monofásicas, impedindo que esses motores sejam usados. Neste capítulo, foram descritos diversos motores capazes de operar com fontes de potência monofásica.

O primeiro motor descrito foi o motor universal. Um motor universal é um motor série CC adaptado para funcionar com uma alimentação CA, sendo a sua característica de conjugado *versus* velocidade similar à de um motor CC série. O motor universal tem um conjugado muito elevado, mas sua regulação de velocidade é muito pobre.

Motores de indução monofásicos não têm conjugado de partida próprio. No entanto, tão logo atinjam a velocidade de operação, suas características de conjugado *versus* velocidade são quase tão boas quanto as dos motores trifásicos de tamanho comparável. A partida pode ser obtida acrescentando um enrolamento auxiliar, cuja corrente tem um ângulo de fase diferente daquele do enrolamento principal, ou então usando polos de estator com partes sombreadas.

O conjugado de partida de um motor de indução monofásico depende do ângulo de fase entre a corrente no enrolamento primário e a corrente no enrolamento auxiliar, sendo que o conjugado máximo ocorre quando o ângulo alcança 90°. Como o modelo de fase dividida propicia apenas uma pequena diferença de fase entre os

enrolamentos principal e auxiliar, seu conjugado de partida é modesto. Os motores com capacitor de partida têm um enrolamento auxiliar com aproximadamente 90° de deslocamento de fase, de modo que apresentam elevados conjugados de partida. Os motores com capacitor permanente, que têm capacitores menores, apresentam conjugados de partida intermediários entre o do motor de fase dividida e o do motor com capacitor de partida. Os motores de polos sombreados têm um deslocamento de fase efetivo muito pequeno e portanto um baixo conjugado de partida.

Os motores de relutância e de histerese são motores CA, para aplicações especiais, que funcionam na velocidade síncrona sem haver necessidade de enrolamentos no rotor como ocorre nos motores síncronos. Além disso, eles podem acelerar até a velocidade síncrona por si próprios. Os estatores desses motores podem ser monofásicos ou trifásicos.

Os motores de passo são motores usados para girar de um ângulo fixo a posição de um eixo ou algum outro dispositivo mecânico. Esse giro (ou passo) de valor fixo ocorre sempre que um pulso de controle é recebido. Eles são largamente utilizados em sistemas de controle para o posicionamento de objetos.

Os motores CC sem escovas são similares aos motores de passo com rotor de ímã permanente, exceto por conterem um sensor de posição. Esse sensor é usado para desligar uma bobina energizada de estator quando o rotor está quase alinhado com ela, de modo que o rotor mantém-se girando com uma velocidade que é definida pela eletrônica de controle. Os motores CC sem escovas são mais caros que os motores CC comuns, mas requerem menos manutenção e têm confiabilidade elevada, longa vida útil e baixo ruído de radio frequência (RF). Eles estão disponíveis apenas em tamanhos pequenos (20 W e menos).

PERGUNTAS

- 9.1 Que modificações são necessárias para que um motor CC série seja adaptado para operar com uma fonte CA de potência?
- 9.2 Por que a característica de conjugado *versus* velocidade de um motor universal ligado a uma fonte de potência CA é diferente da característica de conjugado *versus* velocidade do mesmo motor ligado a uma fonte de potência CC?
- 9.3 Por que um motor de indução monofásico não é capaz de dar partida por si próprio sem o uso de enrolamentos auxiliares especiais?
- 9.4 Como o conjugado induzido é produzido em um motor de indução monofásico (a) de acordo com a teoria do duplo campo girante e (b) de acordo com a teoria do campo cruzado?
- 9.5 Como um enrolamento auxiliar propicia um conjugado de partida para os motores de indução monofásicos?
- 9.6 Como o deslocamento de fase da corrente é obtido no enrolamento auxiliar de um motor de indução de fase dividida?
- 9.7 Como o deslocamento de fase da corrente é obtido no enrolamento auxiliar de um motor de indução com capacitor de partida?
- 9.8 Como o conjugado de partida de um motor com capacitor permanente pode ser comparado com o de um motor com capacitor de partida de mesmo tamanho?
- 9.9 Como o sentido de rotação pode ser invertido no motor de indução de fase dividida e no motor com capacitor de partida?

- 9.10 Como é produzido o conjugado de partida de um motor de polos sombreados?
- 9.11 Como ocorre a partida de um motor de relutância?
- 9.12 Como um motor de relutância pode operar com velocidade síncrona?
- 9.13 Que mecanismos produzem o conjugado de partida em um motor de histerese?
- 9.14 Que mecanismo produz o conjugado síncrono em um motor de histerese?
- 9.15 Explique o funcionamento de um motor de passo.
- 9.16 Qual é a diferença entre um motor de passo do tipo de ímã permanente e um do tipo de relutância?
- 9.17 Qual é o distanciamento ótimo entre as fases de um motor de passo do tipo de relutância? Por quê?
- 9.18 Quais são as vantagens e desvantagens dos motores CC sem escovas, quando comparados com os motores CC comuns com escovas?

PROBLEMAS

- 9.1 Um motor de indução de 120 V, 1/4 HP, 60 Hz, quatro polos e fase dividida, tem as seguintes impedâncias:

$$\begin{array}{lll} R_1 = 2,00 \, \Omega & X_1 = 2,56 \, \Omega & X_M = 60,5 \, \Omega \\ R_2 = 2,80 \, \Omega & X_2 = 2,56 \, \Omega & \end{array}$$

Para um escorregamento de 0,05, as perdas rotacionais do motor são 51 W. Pode-se assumir que as perdas rotacionais são constantes dentro da faixa de funcionamento normal do motor. Para um escorregamento de 0,05, encontre os valores das seguintes grandezas desse motor:

- (a) Potência de entrada
 - (b) Potência de entreferro
 - (c) P_{conv}
 - (d) $P_{\text{saída}}$
 - (e) τ_{ind}
 - (f) τ_{carga}
 - (g) Eficiência total do motor
 - (h) Fator de potência do estator
- 9.2 Repita o Problema 9-1 para um escorregamento de 0,025.
- 9.3 Suponha que é dada a partida no motor do Problema 9-1, mas ocorre uma falha e o enrolamento auxiliar abre-se quando o motor atinge 400 rpm enquanto está acelerando. Quanto conjugado induzido o motor é capaz de produzir somente com o seu enrolamento principal? Assumindo que as perdas rotacionais permanecem sendo de 51 W, esse motor continuará acelerando ou perderá velocidade? Demonstre sua resposta.
- 9.4 Use o MATLAB para calcular e plotar a característica de conjugado *versus* velocidade do motor do Problema 9-1, ignorando o enrolamento de partida.
- 9.5 Um motor de indução de 220 V, 1,5 HP, 50 Hz, seis polos e de partida com capacitor, tem as seguintes impedâncias no enrolamento principal:

$$\begin{array}{lll} R_1 = 1,30 \, \Omega & X_1 = 2,01 \, \Omega & X_M = 105 \, \Omega \\ R_2 = 1,73 \, \Omega & X_2 = 2,01 \, \Omega & \end{array}$$

Para um escorregamento de 0,05, as perdas rotacionais do motor são de 291 W. Pode-se assumir que as perdas rotacionais são constantes dentro da faixa de funcionamento

normal do motor. Para um escorregamento de 5%, encontre os valores das seguintes grandezas desse motor:

- (a) Corrente de estator
- (b) Fator de potência do estator
- (c) Potência de entrada
- (d) P_{EF}
- (e) P_{conv}
- (f) $P_{saída}$
- (g) τ_{ind}
- (h) τ_{carga}
- (i) Eficiência

- 9.6** Encontre o conjugado induzido do motor do Problema 9-5 quando ele está operando com um escorregamento de 5% e sua tensão de terminal é (a) 190 V, (b) 208 V e (c) 230 V.
- 9.7** Que tipo de motor você escolheria para executar cada uma das seguintes tarefas? Por quê?
- (a) Aspirador de pó
 - (b) Refrigerador
 - (c) Compressor de ar condicionado
 - (d) Ventilador de ar condicionado
 - (e) Máquina de costura de velocidade variável
 - (f) Relógio elétrico
 - (g) Furadeira elétrica
- 9.8** Em uma aplicação em particular, um motor de passo trifásico deve ser capaz de dar passos de 10° de incremento. Quantos polos ele deve ter?
- 9.9** Quantos pulsos por segundo devem ser fornecidos à unidade de controle do motor do Problema 9-8 para que ele consiga girar com uma velocidade de 600 rpm?
- 9.10** Construa uma tabela mostrando a relação entre o tamanho do passo e o número de polos, para motores de passo trifásicos e de quatro polos.

REFERÊNCIAS

1. Fitzgerald, A. E. e C. Kingsley, Jr.: *Electric Machinery*, McGraw-Hill, Nova York, 1952.
2. National Electrical Manufacturers Association, *Motors and Generators*, Publicação MG1-1993, NEMA, Washington, 1993.
3. Werninck, E. H. (ed.): *Electric Motor Handbook*, McGraw-Hill, London, 1978.
4. Veinott, G. C.: *Fractional and Subfractional Horsepower Electric Motors*, McGraw-Hill, Nova York, 1970.