
capítulo

7

Fundamentos de máquinas CC

OBJETIVOS DE APRENDIZAGEM

- Compreender como a tensão é induzida em uma espira simples em rotação.
 - Compreender como as faces polares curvas contribuem para um fluxo constante e assim para tensões de saída mais constantes.
 - Compreender e saber usar a equação da tensão e do conjugado induzidos em uma máquina CC.
 - Compreender a comutação.
 - Compreender os problemas da comutação, incluindo a reação de armadura e os efeitos $L \frac{di}{dt}$
 - Compreender o diagrama de fluxo de potência das máquinas CC.
-

As máquinas CC são geradores que convertem a energia mecânica em energia elétrica CC e motores que convertem a energia elétrica CC em energia mecânica. A maioria das máquinas CC é como as máquinas CA no sentido de que elas contêm tensões e correntes CA em seu interior – as máquinas CC têm uma saída CC somente porque existe um mecanismo que converte as tensões CA internas em tensões CC em seus terminais. Como esse mecanismo é denominado comutador, as máquinas CC são também conhecidas como *máquinas de comutação*.

Os princípios fundamentais envolvidos no funcionamento das máquinas CC são muito simples. Infelizmente, algumas vezes essa simplicidade fica obscurecida pela construção complicada das máquinas reais. Este capítulo explicará primeiro os princípios de funcionamento da máquina CC usando exemplos simples e, em seguida, discutirá algumas das complicações que ocorrem nas máquinas CC reais.

7.1 UMA ESPIRA SIMPLES GIRANDO ENTRE FACES POLARES CURVADAS

A máquina linear estudada na Seção 1.8 serviu de introdução ao comportamento básico das máquinas elétricas. Sua resposta às cargas e aos campos magnéticos

variáveis assemelha-se estreitamente ao comportamento dos geradores e motores CC reais que estudaremos no Capítulo 8. Entretanto, os geradores e motores reais não se movem em uma linha reta – eles *giram*. O próximo passo em direção à compreensão das máquinas CC reais é estudar o exemplo mais simples de máquina rotativa.

O exemplo mais simples de máquina rotativa CC está mostrado na Figura 7-1. Ele consiste em uma única espira de fio girando em torno de um eixo fixo. A parte rotativa dessa máquina é denominada *rotor* e a parte estacionária é denominada *estator*. O campo magnético da máquina é alimentado pelos polos norte e sul mostrados na Figura 7-1.

Observe que a espira de fio do rotor está colocada em uma ranhura encaixada em um núcleo ferromagnético. O rotor de ferro, juntamente com a forma curvada das faces dos polos, propicia um entreferro de ar com largura constante entre o rotor e o estator. Lembre-se do Capítulo 1 que a relutância do ar é muito superior à relutância do ferro na máquina. Para minimizar a relutância do caminho de fluxo através da máquina, o fluxo magnético deve percorrer o caminho mais curto possível entre a face do polo e a superfície do rotor.

Como o fluxo magnético deve tomar o caminho mais curto através do ar, ele é *perpendicular* à superfície do rotor em todos os pontos debaixo das faces polares. Também, como o entreferro tem largura uniforme, a relutância é a mesma em qualquer ponto debaixo das faces polares. A relutância uniforme significa que a densidade de fluxo magnético é constante em todos os pontos debaixo das faces polares.

A tensão induzida em uma espira em rotação

Se o rotor dessa máquina girar, uma tensão será induzida na espira de fio. Para determinar o valor e a forma da tensão, examine a Figura 7-2. A espira de fio mostrada é retangular, com os lados *ab* e *cd* perpendiculares ao plano da página e com os lados *bc* e *da* paralelos ao plano da página. O campo magnético é constante e perpendicular à superfície do rotor em todos os pontos debaixo das faces polares e rapidamente cai a zero além das bordas dos polos.

Para determinar a tensão total e_{tot} na espira, examine cada segmento da espira separadamente e some todas as tensões resultantes. A tensão em cada segmento é dada pela Equação (1-45):

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

1. *Segmento ab*. Nesse segmento, a velocidade do fio é tangencial ao círculo descrito pela rotação. O campo magnético \mathbf{B} aponta perpendicularmente para *fora* da superfície em todos os pontos debaixo da face do polo e é zero além das bordas da face do polo. Debaixo da face polar, a velocidade \mathbf{v} é perpendicular a \mathbf{B} e o produto $\mathbf{v} \times \mathbf{B}$ aponta para dentro da página. Portanto, a tensão induzida no segmento é

$$e_{ba} = (\mathbf{v} \times \mathbf{B}) \cdot \mathbf{l} = \begin{cases} vBl & \text{positiva para dentro da página} & \text{debaixo da face do polo} \\ 0 & & \text{além das bordas do polo} \end{cases} \quad (7-1)$$

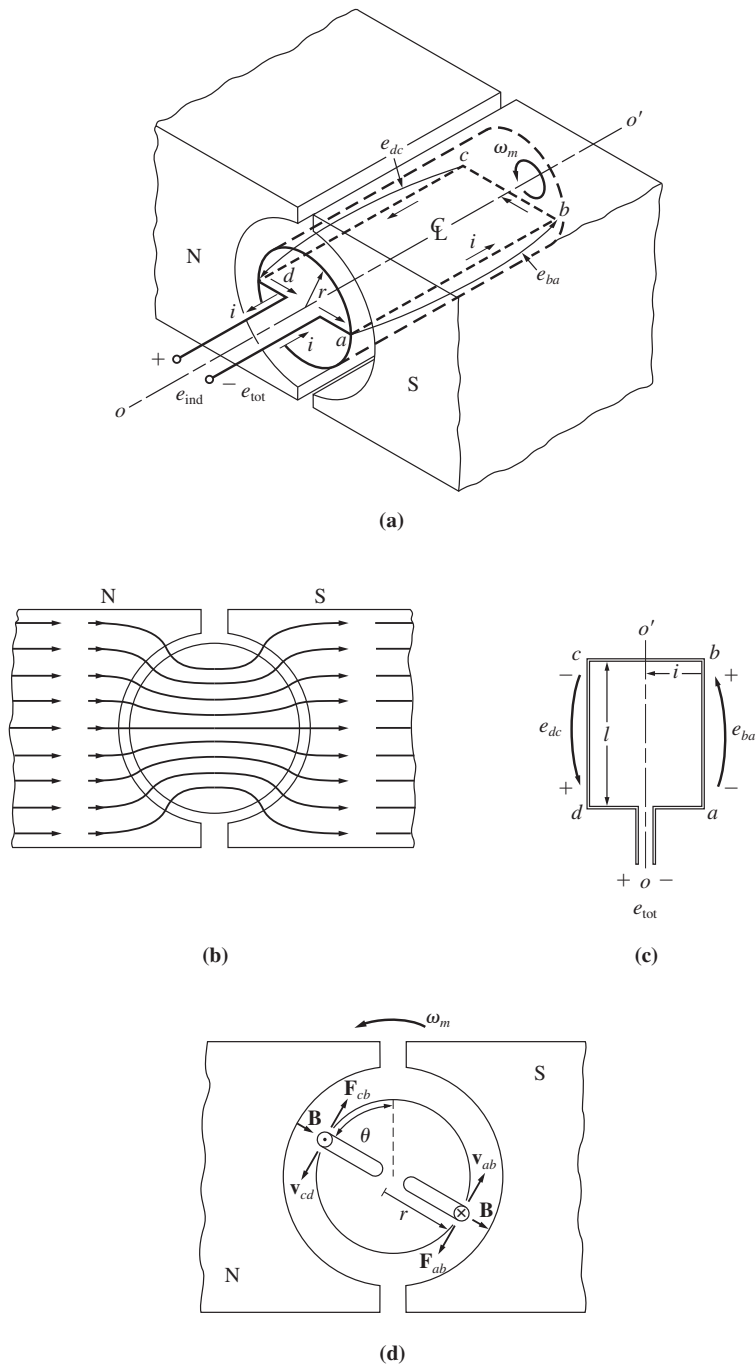


FIGURA 7-1
 Uma espira simples girando entre as faces curvadas dos polos. (a) Vista em perspectiva; (b) vista das linhas de campo; (c) vista superior; (d) vista frontal.

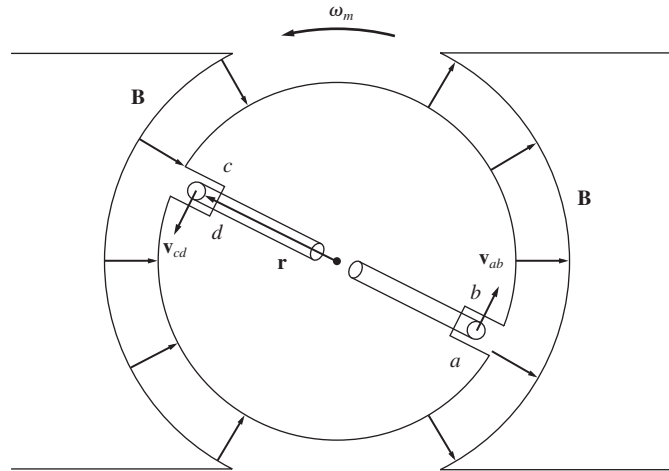


FIGURA 7-2
Desenvolvimento de uma equação para as tensões induzidas na espira.

2. *Segmento bc.* Nesse segmento, o produto $\mathbf{v} \times \mathbf{B}$ aponta para dentro ou para fora da página, ao passo que o comprimento \mathbf{l} está contido no plano da página. Assim, o produto vetorial $\mathbf{v} \times \mathbf{B}$ é perpendicular a \mathbf{l} . Portanto, a tensão no segmento bc será zero:

$$e_{cb} = 0 \tag{7-2}$$

3. *Segmento cd.* Nesse segmento, a velocidade do fio é tangencial à trajetória descrita pela rotação. O campo magnético \mathbf{B} aponta perpendicularmente para *dentro* da superfície do rotor em todos os pontos debaixo da superfície polar e é zero além das bordas da face do polo. Debaixo da face polar, a velocidade \mathbf{v} é perpendicular a \mathbf{B} e o produto $\mathbf{v} \times \mathbf{B}$ aponta para fora da página. Portanto, a tensão induzida no segmento é

$$e_{dc} = (\mathbf{v} \times \mathbf{B}) \cdot \mathbf{l} = \begin{cases} vBl & \text{positiva para fora da página} & \text{debaixo da face do polo} \\ 0 & & \text{além das bordas do polo} \end{cases} \tag{7-3}$$

4. *Segmento da.* Como no segmento bc , o produto $\mathbf{v} \times \mathbf{B}$ é perpendicular a \mathbf{l} . Portanto, a tensão nesse segmento também será zero:

$$e_{ad} = 0 \tag{7-4}$$

A tensão total induzida e_{ind} na espira é dada por

$$e_{\text{ind}} = e_{ba} + e_{cb} + e_{dc} + e_{ad}$$

$$e_{\text{ind}} = \begin{cases} 2vBl & \text{debaixo das faces dos polos} \\ 0 & \text{além das bordas dos polos} \end{cases} \tag{7-5}$$

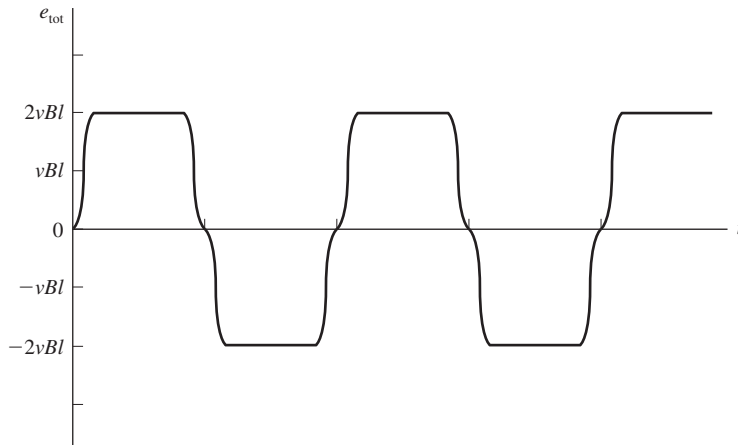


FIGURA 7-3
A tensão de saída da espira.

Quando a espira gira 180° , o segmento ab fica debaixo da face do polo norte em vez da face do polo sul. Nesse momento, o sentido da tensão no segmento fica invertido, mas seu valor permanece constante. A tensão resultante e_{tot} está mostrada como uma função de tempo na Figura 7-3.

Há um modo alternativo de expressar a Equação (7-5), que relaciona claramente o comportamento dessa espira simples com o comportamento das máquinas CC reais de maior porte. Para deduzir essa expressão alternativa, examine a Figura 7-4 nova-

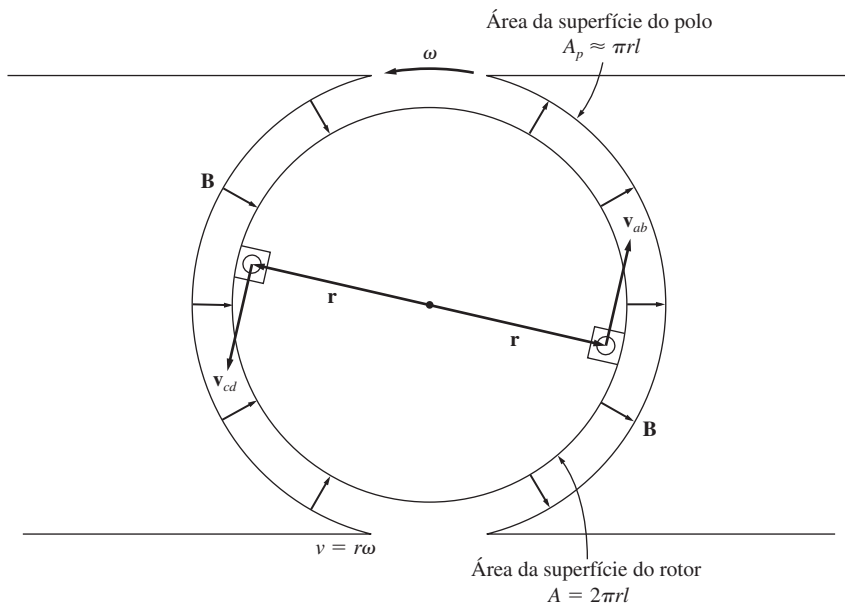


FIGURA 7-4
Dedução de uma forma alternativa da equação da tensão induzida.

mente. Observe que a velocidade tangencial v das bordas da espira pode ser expressa como

$$v = r\omega_m$$

em que r é o raio de rotação da espira e ω_m é a velocidade angular da espira. Substituindo essa expressão na Equação (7-5), teremos

$$e_{\text{ind}} = \begin{cases} 2r\omega_m Bl & \text{debaixo das faces dos polos} \\ 0 & \text{além das bordas dos polos} \end{cases}$$

$$e_{\text{ind}} = \begin{cases} 2r l B \omega_m & \text{debaixo das faces dos polos} \\ 0 & \text{além das bordas dos polos} \end{cases}$$

Observe também, na Figura 7-4, que a superfície do rotor é um cilindro, de modo que a área A da superfície do rotor é simplesmente igual a $2\pi rl$. Como há dois polos, a área do rotor *debaixo de cada* polo (ignorando os pequenos intervalos entre os polos) é $A_p = \pi rl$. Portanto,

$$e_{\text{ind}} = \begin{cases} \frac{2}{\pi} A_p B \omega_m & \text{debaixo das faces dos polos} \\ 0 & \text{além das bordas dos polos} \end{cases}$$

Como a densidade de fluxo B é constante no entreferro em todos os pontos debaixo das faces dos polos, o fluxo total debaixo de cada polo é simplesmente a área do polo vezes sua densidade de fluxo:

$$\phi = A_p B$$

Portanto, a forma final da equação de tensão é

$$e_{\text{ind}} = \begin{cases} \frac{2}{\pi} \phi \omega_m & \text{debaixo das faces dos polos} \\ 0 & \text{além das bordas dos polos} \end{cases} \quad (7-6)$$

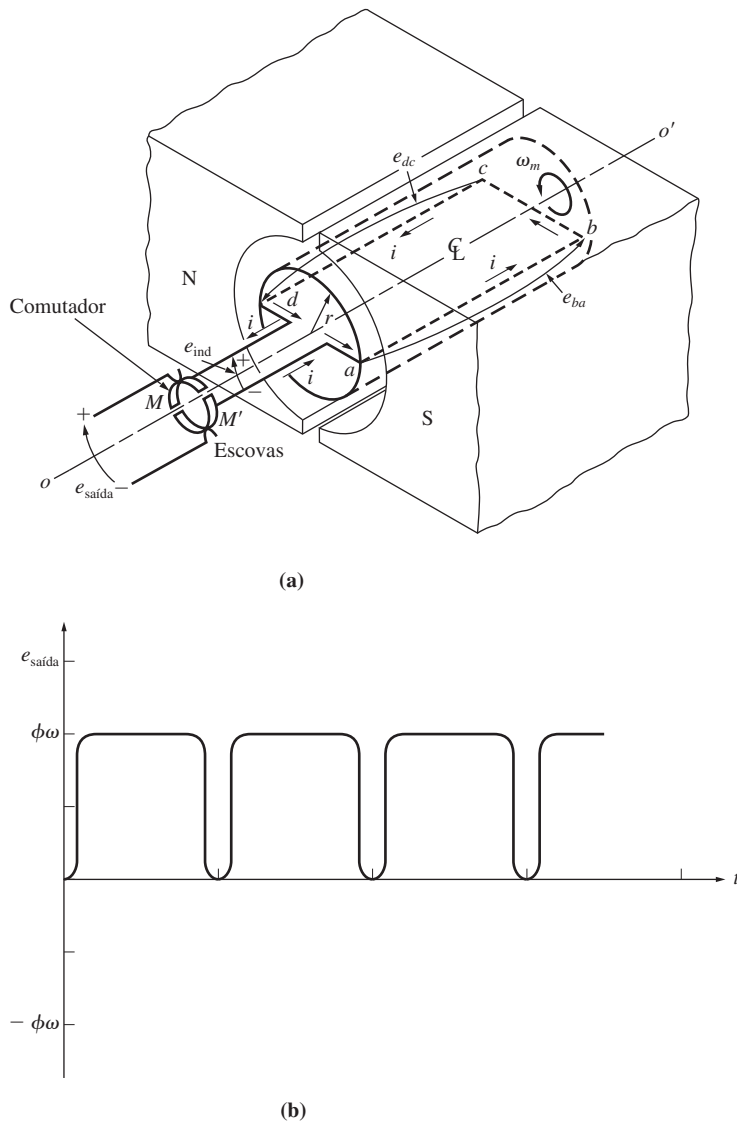
Assim, a tensão gerada na máquina é igual ao produto do fluxo presente no interior da máquina vezes a velocidade de rotação da máquina, multiplicado por uma constante que representa os aspectos construtivos da máquina. Em geral, a tensão em qualquer máquina real dependerá dos mesmos três fatores:

1. O fluxo na máquina
2. A velocidade de rotação
3. Uma constante que represente a construção da máquina

Obtendo uma tensão CC da espira em rotação

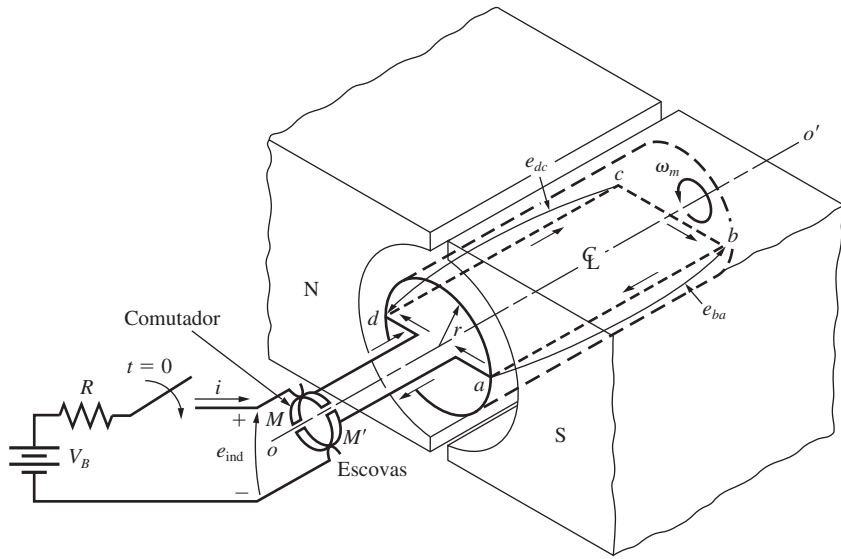
A Figura 7-3 é um gráfico da tensão e_{tot} gerada pela espira em rotação. Como mostrado, a tensão na espira é alternativamente um valor positivo constante e um valor negativo constante. Como adaptar essa máquina para produzir uma tensão CC em vez da tensão CA que ela fornece agora?

Uma maneira de fazê-lo está mostrada na Figura 7-5a. Aqui, dois segmentos condutores semicirculares são acrescentados à extremidade da espira e dois contatos

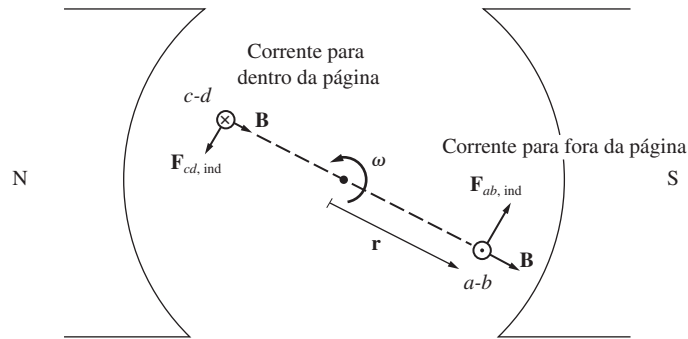
**FIGURA 7-5**

Produção de uma tensão de saída CC na máquina por meio de um comutador e escovas. (a) Vista em perspectiva; (b) tensão de saída resultante.

fixos são instalados em um ângulo tal que, no instante em que a tensão na espira é zero, os contatos põem em curto-circuito os dois segmentos. Desse modo, *sempre que a tensão na espira muda de sentido, os contatos também mudam de segmento e a saída de tensão dos contatos sempre é do mesmo tipo* (Figura 7-5b). Esse processo de troca de conexões é conhecido como *comutação*. Os segmentos semicirculares rotativos são denominados *segmentos comutadores* ou *anel comutador* e os contatos fixos são denominados *escovas*.



(a)



(b)

FIGURA 7-6

Obtenção de uma equação para o conjugado induzido na espira. Observe que o núcleo de ferro não está mostrado na parte **b** para melhor compreensão.

O conjugado induzido na espira em rotação

Agora, suponha que uma bateria seja conectada à máquina da Figura 7-5. A configuração resultante está mostrada na Figura 7-6. Quanto conjugado será produzido na espira quando a chave for fechada e uma corrente circular nela? Para determinar o conjugado, examine a espira detalhadamente como está mostrado na Figura 7-6b.

A abordagem a ser adotada para determinar o conjugado sobre a espira é a de examinar um segmento de cada vez e depois somar os efeitos de todos os segmentos individuais. A força que atua sobre um dado segmento da espira é dada pela Equação (1-43):

$$\mathbf{F} = i(\mathbf{l} \times \mathbf{B}) \quad (1-43)$$

e o conjugado sobre o segmento é dado por

$$\tau = rF \text{ sen } \theta \quad (1-6)$$

em que θ é o ângulo entre \mathbf{r} e \mathbf{F} . O conjugado é basicamente zero sempre que a espira estiver além das bordas dos polos.

Quando a espira está debaixo das faces dos polos, o conjugado é

1. *Segmento ab*. No segmento *ab*, o sentido da corrente da bateria é para fora da página. O campo magnético debaixo da face polar está apontando radialmente para fora do rotor. Assim, a força sobre o fio é dada por

$$\begin{aligned} \mathbf{F}_{ab} &= i(\mathbf{l} \times \mathbf{B}) \\ &= ilB \quad \text{tangente ao sentido do movimento} \end{aligned} \quad (7-7)$$

O conjugado causado por essa força sobre o rotor é

$$\begin{aligned} \tau_{ab} &= rF \text{ sen } \theta \\ &= r(ilB) \text{ sen } 90^\circ \\ &= rilB \quad \text{anti-horário} \end{aligned} \quad (7-8)$$

2. *Segmento bc*. No segmento *bc*, o sentido da corrente da bateria é da parte superior esquerda para a parte inferior direita da figura. A força induzida sobre o fio é dada por

$$\begin{aligned} \mathbf{F}_{bc} &= i(\mathbf{l} \times \mathbf{B}) \\ &= 0 \quad \text{porque } \mathbf{l} \text{ é paralelo a } \mathbf{B} \end{aligned} \quad (7-9)$$

Portanto,

$$\tau_{bc} = 0 \quad (7-10)$$

3. *Segmento cd*. No segmento *cd*, o sentido da corrente da bateria é para dentro da página. O campo magnético debaixo da face polar está apontando radialmente para dentro do rotor. Assim, a força sobre o fio é dada por

$$\begin{aligned} \mathbf{F}_{cd} &= i(\mathbf{l} \times \mathbf{B}) \\ &= ilB \quad \text{tangente ao sentido do movimento} \end{aligned} \quad (7-11)$$

O conjugado causado por essa força sobre o rotor é

$$\begin{aligned} \tau_{cd} &= rF \text{ sen } \theta \\ &= r(ilB) \text{ sen } 90^\circ \\ &= rilB \quad \text{anti-horário} \end{aligned} \quad (7-12)$$

4. *Segmento da*. No segmento *da*, o sentido da corrente da bateria é da parte inferior direita para a parte superior esquerda da figura. A força induzida sobre o fio é dada por

$$\begin{aligned} \mathbf{F}_{da} &= i(\mathbf{I} \times \mathbf{B}) \\ &= 0 \quad \text{porque } \mathbf{I} \text{ é paralelo a } \mathbf{B} \end{aligned} \quad (7-13)$$

Portanto,

$$\tau_{da} = 0 \quad (7-14)$$

O conjugado total resultante induzido na espira é dado por

$$\tau_{ind} = \tau_{ab} + \tau_{bc} + \tau_{cd} + \tau_{da}$$

| |
|--|
| $\tau_{ind} = \begin{cases} 2rilB & \text{debaixo das faces dos polos} \\ 0 & \text{além das bordas dos polos} \end{cases} \quad (7-15)$ |
|--|

Usando o fato de que $A_p \approx \pi rl$ e $\phi = A_p B$, a expressão para o conjugado pode ser reduzida a

| |
|---|
| $\tau_{ind} = \begin{cases} \frac{2}{\pi} \phi i & \text{debaixo das faces dos polos} \\ 0 & \text{além das bordas dos polos} \end{cases} \quad (7-16)$ |
|---|

Assim, o conjugado produzido na máquina é o produto do fluxo presente no interior da máquina vezes a corrente na máquina, multiplicado por uma constante que representa os aspectos construtivos mecânicos da máquina (a porcentagem do rotor que está coberta pelas faces dos polos). Em geral, a tensão em *qualquer* máquina real dependerá dos mesmos três fatores:

1. O fluxo na máquina
2. A corrente na máquina
3. Uma constante que representa a construção da máquina

EXEMPLO 7-1 A Figura 7-6 mostra uma espira simples girando entre as faces curvadas de dois polos e está conectada a uma bateria, um resistor e uma chave. O resistor mostrado na figura modela a resistência total da bateria e do fio da máquina. As dimensões físicas e características dessa máquina são

$$\begin{aligned} r &= 0,5 \text{ m} & l &= 1,0 \text{ m} \\ R &= 0,3 \ \Omega & B &= 0,25 \text{ T} \\ V_B &= 120 \text{ V} \end{aligned}$$

- (a) Que acontece quando a chave é fechada?
- (b) Qual é a corrente de partida máxima da máquina? Qual é sua velocidade angular a vazio, sem carga, em regime permanente?
- (c) Suponha que uma carga seja aplicada à espira e que o conjugado de carga resultante seja $10 \text{ N} \cdot \text{m}$. Qual seria a nova velocidade de regime permanente? Quanta potência é fornecida ao eixo da máquina? Quanta potência está sendo fornecida pela bateria? Essa máquina é um motor ou um gerador?

- (d) Suponha que a carga seja novamente retirada da máquina e um conjugado de $7,5 \text{ N} \cdot \text{m}$ seja aplicado ao eixo no sentido de rotação. Qual é a nova velocidade de regime permanente? Essa máquina é agora um motor ou um gerador?
- (e) Suponha que a máquina esteja operando a vazio. Qual seria a velocidade final em regime permanente do rotor se a densidade de fluxo fosse reduzida a $0,20 \text{ T}$?

Solução

- (a) Quando a chave da Figura 7-6 é fechada, uma corrente circula na espira. Como a espira está inicialmente parada, temos $e_{\text{ind}} = 0$. Portanto, a corrente será dada por

$$i = \frac{V_B - e_{\text{ind}}}{R} = \frac{V_B}{R}$$

Essa corrente circula na espira, produzindo um conjugado

$$\tau_{\text{ind}} = \frac{2}{\pi} \phi i \quad \text{anti-horário}$$

Esse conjugado induzido produz uma aceleração angular em sentido anti-horário, de modo que o rotor da máquina começa a girar. No entanto, quando o rotor começa a girar, uma tensão induzida é produzida no motor, dada por

$$e_{\text{ind}} = \frac{2}{\pi} \phi \omega_m$$

e, desse modo, a corrente i diminui. Quando isso acontece, temos que $\tau_{\text{ind}} = (2/\pi)\phi i \downarrow$ diminui e a máquina gira em regime permanente com o conjugado $\tau_{\text{ind}} = 0$ e a tensão da bateria $V_B = e_{\text{ind}}$.

Esse é o mesmo tipo de comportamento de partida que já vimos anteriormente na máquina linear CC.

- (b) Nas *condições de partida*, a corrente da máquina é

$$i = \frac{V_B}{R} = \frac{120 \text{ V}}{0,3 \Omega} = 400 \text{ A}$$

Em *condições de regime permanente a vazio*, o conjugado induzido τ_{ind} deve ser zero. No entanto, $\tau_{\text{ind}} = 0$ implica que a corrente i deve ser zero, porque $\tau_{\text{ind}} = (2/\pi)\phi i$, e que o fluxo não é zero. O fato de que $i = 0 \text{ A}$ significa que a tensão da bateria deve ser $V_B = e_{\text{ind}}$. Portanto, a velocidade do rotor é

$$\begin{aligned} V_B = e_{\text{ind}} &= \frac{2}{\pi} \phi \omega_m \\ \omega &= \frac{V_B}{(2/\pi)\phi} = \frac{V_B}{2rIB} \\ &= \frac{120 \text{ V}}{2(0,5 \text{ m})(1,0 \text{ m})(0,25 \text{ T})} = 480 \text{ rad/s} \end{aligned}$$

- (c) Se um conjugado de carga de $10 \text{ N} \cdot \text{m}$ for aplicado ao eixo da máquina, ela começará a perder velocidade. No entanto, quando ω diminui, a tensão $e_{\text{ind}} = (2/\pi)\phi\omega \downarrow$ diminui e a corrente do rotor aumenta [$i = (V_B - e_{\text{ind}} \downarrow)/R$]. Quando a corrente do rotor aumenta, temos que $|\tau_{\text{ind}}|$ também aumenta até que ocorra $|\tau_{\text{ind}}| = |\tau_{\text{carga}}|$ em uma velocidade menor ω . Em regime permanente, temos $|\tau_{\text{carga}}| = |\tau_{\text{ind}}| = (2/\pi)\phi i$. Portanto,

$$\begin{aligned} i &= \frac{\tau_{\text{ind}}}{(2/\pi)\phi} = \frac{\tau_{\text{ind}}}{2rIB} \\ &= \frac{10 \text{ N} \cdot \text{m}}{(2)(0,5 \text{ m})(1,0 \text{ m})(0,25 \text{ T})} = 40 \text{ A} \end{aligned}$$

Pela lei das tensões de Kirchhoff, temos $e_{\text{ind}} = V_B - iR$, de modo que

$$e_{\text{ind}} = 120 \text{ V} - (40 \text{ A})(0,3 \Omega) = 108 \text{ V}$$

Finalmente, a velocidade do eixo é

$$\begin{aligned} \omega &= \frac{e_{\text{ind}}}{(2/\pi)\phi} = \frac{e_{\text{ind}}}{2rIB} \\ &= \frac{108 \text{ V}}{(2)(0,5 \text{ m})(1,0 \text{ m})(0,25 \text{ T})} = 432 \text{ rad/s} \end{aligned}$$

A potência fornecida ao eixo é

$$\begin{aligned} P &= \tau\omega_m \\ &= (10 \text{ N} \cdot \text{m})(432 \text{ rad/s}) = 4320 \text{ W} \end{aligned}$$

A potência fornecida pela bateria é

$$P = V_B i = (120 \text{ V})(40 \text{ A}) = 4800 \text{ W}$$

Essa máquina está operando como um *motor*, convertendo potência elétrica em potência mecânica.

- (d) Se um conjugado for aplicado no sentido do movimento, o rotor irá acelerar. Quando a velocidade cresce, a tensão interna e_{ind} aumenta e ultrapassa V_B , de modo que a corrente sai da máquina e entra na bateria. Agora, essa máquina é um *gerador*. Essa corrente causa um conjugado induzido oposto ao sentido de rotação. O conjugado induzido opõe-se ao conjugado externo aplicado e, depois de algum tempo, teremos $|\tau_{\text{carga}}| = |\tau_{\text{ind}}|$, em uma velocidade mais elevada ω_m .

A corrente no rotor será

$$\begin{aligned} i &= \frac{\tau_{\text{ind}}}{(2/\pi)\phi} = \frac{\tau_{\text{ind}}}{2rIB} \\ &= \frac{7,5 \text{ N} \cdot \text{m}}{(2)(0,5 \text{ m})(1,0 \text{ m})(0,25 \text{ T})} = 30 \text{ A} \end{aligned}$$

A tensão induzida e_{ind} é

$$\begin{aligned} e_{\text{ind}} &= V_B + iR \\ &= 120 \text{ V} + (30 \text{ A})(0,3 \Omega) \\ &= 129 \text{ V} \end{aligned}$$

Finalmente, a velocidade no eixo é

$$\begin{aligned} \omega &= \frac{e_{\text{ind}}}{(2/\pi)\phi} = \frac{e_{\text{ind}}}{2rIB} \\ &= \frac{129 \text{ V}}{(2)(0,5 \text{ m})(1,0 \text{ m})(0,25 \text{ T})} = 516 \text{ rad/s} \end{aligned}$$

- (e) Como nas condições originais, a máquina está inicialmente sem carga. Portanto, a velocidade é $\omega_m = 480 \text{ rad/s}$. Se o fluxo diminuir, haverá um transitório. Entretanto, após o transitório, a máquina deverá novamente ter conjugado zero, porque ainda não foi aplicada carga a seu eixo. Se $\tau_{\text{ind}} = 0$, a corrente no rotor deverá ser zero e $V_B = e_{\text{ind}}$. Assim, a velocidade no eixo será

$$\begin{aligned} \omega &= \frac{e_{\text{ind}}}{(2/\pi)\phi} = \frac{e_{\text{ind}}}{2rIB} \\ &= \frac{120 \text{ V}}{(2)(0,5 \text{ m})(1,0 \text{ m})(0,20 \text{ T})} = 600 \text{ rad/s} \end{aligned}$$

Observe que quando o fluxo na máquina diminui, sua velocidade aumenta. Esse é o mesmo comportamento visto na máquina linear e também o mesmo que é observado em motores CC reais.

7.2 COMUTAÇÃO EM UMA MÁQUINA SIMPLES DE QUATRO ESPIRAS

A *comutação* é o processo de converter as tensões e correntes CA do rotor de uma máquina CC em tensões e correntes CC em seus terminais. É a parte mais crítica do projeto e funcionamento de qualquer máquina CC. É necessário um estudo mais detalhado para determinar exatamente como ocorre essa conversão e para descobrir quais são os problemas associados. Nesta seção, a técnica de comutação será explicada para o caso de uma máquina mais complexa do que a máquina de uma única espira da Seção 7.1, mas menos complexa do que uma máquina CC real. A Seção 7.3 continuará este desenvolvimento e explicará como ocorre a comutação nas máquinas CC reais.

Uma máquina CC simples de quatro espiras e dois polos está mostrada na Figura 7-7. Essa máquina tem quatro espiras completas alojadas em quatro ranhuras abertas no aço laminado do seu rotor. As faces dos polos da máquina são curvadas para propiciar um entreferro de tamanho uniforme e para dar uma densidade homogênea de fluxo em todos os pontos debaixo das faces dos polos.

As quatro espiras da máquina estão alojadas de forma especial nas ranhuras. Para cada espira, o lado da espira sem a marca de linha (') é o condutor que está na parte mais externa da ranhura, ao passo que o lado com a marca de linha (') é o condutor que está na parte mais interna da ranhura diametralmente oposta*. As ligações dos enrolamentos com o comutador da máquina estão mostradas na Figura 7-7b. Observe que a espira 1 estende-se entre os segmentos *a* e *b* do comutador, a espira 2 estende-se entre os segmentos *b* e *c* e assim por diante em torno do rotor.

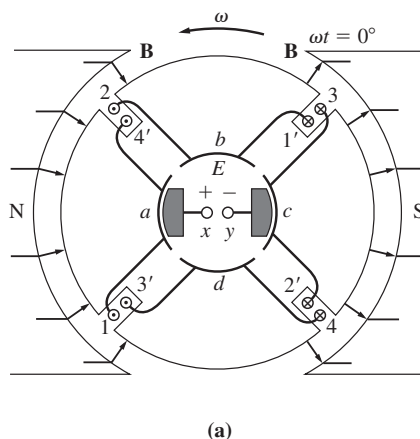


FIGURA 7-7

(a) Uma máquina CC de quatro espiras e dois polos, mostrada no instante $\omega t = 0^\circ$. (*continua*)

* N. de T.: A parte mais interna de uma ranhura é conhecida como fundo da ranhura e a parte mais externa é o topo ou boca da ranhura.

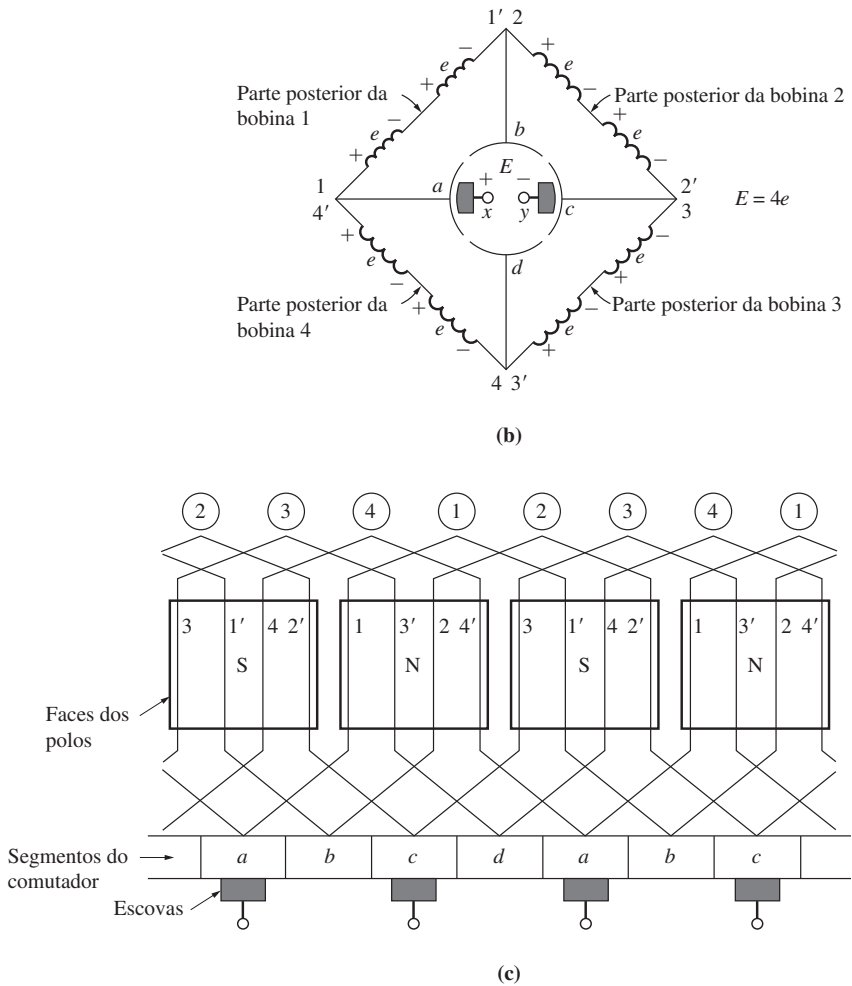


FIGURA 7-7 (conclusão)

(b) As tensões nos condutores do rotor neste instante. (c) Um diagrama dos enrolamentos dessa máquina mostrando as interconexões das espiras do rotor.

No instante mostrado na Figura 7-7, os lados 1, 2, 3' e 4' das espiras estão debaixo da face do polo norte, ao passo que os lados 1', 2', 3 e 4 das espiras estão debaixo da face do polo sul. A tensão em cada um dos lados 1, 2, 3' e 4' das espiras é dada por

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

$$e_{\text{ind}} = vBl \quad \text{positivo para fora da página} \quad (7-17)$$

A tensão em cada um dos lados 1', 2', 3 e 4 das espiras é dada por

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

$$= vBl \quad \text{positivo para dentro da página} \quad (7-18)$$

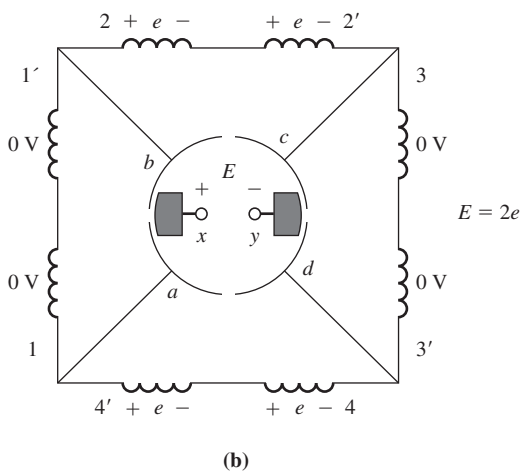
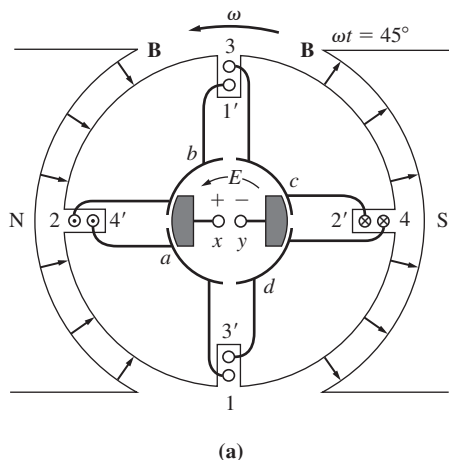


FIGURA 7-8
A mesma máquina no instante $\omega t = 45^\circ$, mostrando as tensões nos condutores.

O resultado final está mostrado na Figura 7-7b. Nessa figura, cada enrolamento representa um dos dois lados (ou *condutores*) de uma espira. Se a tensão induzida em qualquer um dos lados ou condutores de uma espira for denominada $e = vBl$, a tensão total nas escovas da máquina será

$$E = 4e \quad \omega t = 0^\circ \tag{7-19}$$

Observe que há dois caminhos em paralelo para a corrente dentro da máquina. A existência de dois ou mais caminhos em paralelo para as correntes do rotor é uma característica comum de todos os esquemas de comutação.

Que acontecerá com a tensão E nos terminais quando o rotor continuar girando? Para descobrir, examine a Figura 7-8. Essa figura mostra a máquina no instante $\omega t = 45^\circ$. Nesse momento, as espiras 1 e 3 giraram até o espaço entre os polos*, de modo

* N. de T.: Também conhecido como zona neutra ou espaço interpolar.

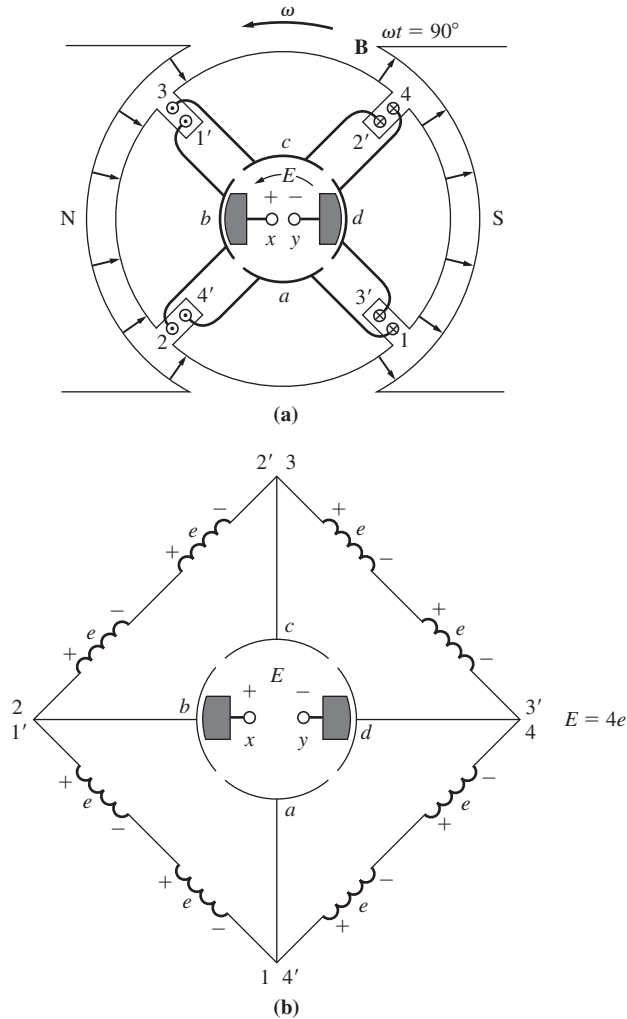


FIGURA 7-9

A mesma máquina no instante $\omega t = 90^\circ$, mostrando as tensões nos condutores.

que a tensão em cada uma delas é zero. Observe que nesse instante as escovas da máquina colocam em curto-circuito os segmentos ab e cd . Isso acontece exatamente no momento em que as espiras entre esses segmentos apresentam 0 V, de modo que o curto-circuito nos segmentos não causa problemas. Nesse instante, somente as espiras 2 e 4 estão debaixo das faces dos polos, de modo que a tensão de terminal E é dada por

$$E = 2e \quad \omega t = 0^\circ \tag{7-20}$$

Agora, deixemos o rotor continuar a girar por mais 45° . A situação resultante é a mostrada na Figura 7-9. Aqui, os lados 1', 2, 3 e 4' das espiras estão debaixo da face

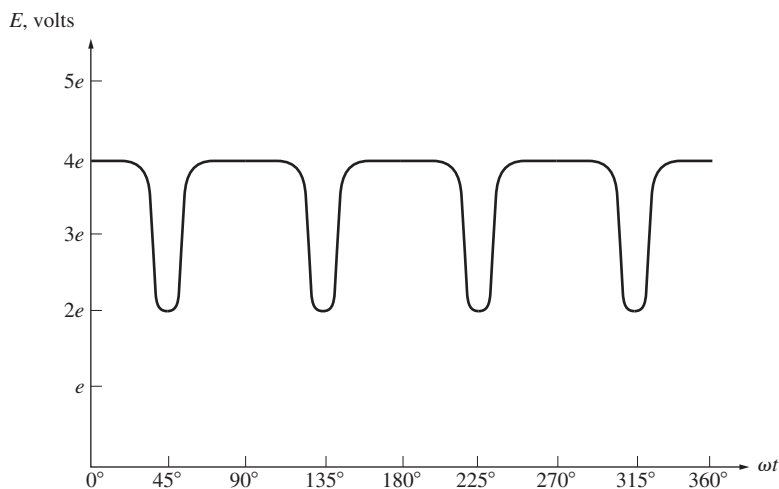


FIGURA 7-10
Tensão de saída resultante da máquina da Figura 7-7.

do polo norte e os lados 1, 2', 3' e 4 das espiras estão debaixo da face do polo sul. As tensões ainda estão sendo geradas para fora da página nos lados debaixo da face do polo norte e para dentro da página nos lados debaixo da face do polo sul. O diagrama da tensão resultante está mostrado na Figura 7-9b. Agora, para cada caminho paralelo da máquina, há quatro lados de espiras apresentando tensão, de modo que a tensão de terminal E é dada por

$$E = 4e \quad \omega t = 90^\circ \quad (7-21)$$

Compare a Figura 7-7 com a Figura 7-9. Observe que *as tensões nas espiras 1 e 3 foram invertidas entre as duas figuras, mas, como as suas conexões também foram invertidas, a tensão total permanece sendo gerada com o mesmo sentido de antes*. Esse fato é a essência de todos os sistemas de comutação. Sempre que a tensão é invertida em uma espira, as conexões da espira também são trocadas de modo que a tensão total permanece sendo produzida com o sentido original.

Para essa máquina, a tensão de terminal em função do tempo é a mostrada na Figura 7-10. Esta é uma aproximação melhor de um nível CC do que aquela produzida na Seção 7.1 por uma única espira. Quando o número de espiras no rotor aumenta, a aproximação para uma tensão CC perfeita continua a se tornar cada vez melhor.

Em resumo,

Comutação é o processo de chavear as conexões das espiras do rotor de uma máquina CC exatamente no momento em que a tensão na espira inverte a polaridade, de forma a manter uma tensão de saída CC basicamente constante.

Como no caso da bobina de uma única espira simples, os segmentos rotativos aos quais as bobinas são conectadas são denominados *segmentos comutadores* e as peças estacionárias que atuam sobre os segmentos em rotação são denominadas *escovas*. Os segmentos comutadores das máquinas reais são feitos tipicamente de barras

de cobre. As escovas são feitas de uma mistura à base de grafite, de modo que causam um atrito muito baixo quando se friccionam ao deslizar sobre os segmentos comutadores em movimento.

7.3 COMUTAÇÃO E CONSTRUÇÃO DA ARMADURA EM MÁQUINAS CC REAIS

Nas máquinas CC reais, há diversas formas de conectar as espiras do rotor (também denominado *armadura*) aos segmentos do comutador. Essas diferentes conexões afetam o número de caminhos paralelos de corrente dentro do rotor, a tensão de saída do rotor e o número e a posição das escovas que friccionam os segmentos comutadores. Agora, examinaremos a construção das bobinas de um rotor CC real e em seguida examinaremos como elas são conectadas ao comutador para produzir uma tensão CC.

As bobinas do rotor

Independentemente do modo pelo qual os enrolamentos são conectados aos segmentos comutadores, a maioria dos enrolamentos do rotor consiste em bobinas pré-fabricadas em forma de diamante que são inseridas nas ranhuras da armadura como uma peça única (veja a Figura 7-11). Cada bobina consiste em diversas *espiras* (laços) de fio condutor e cada espira é encapada e isolada das demais espiras e da ranhura do rotor. Cada lado de uma espira é denominado *condutor*. O número de condutores da armadura de máquina é dado por

$$Z = 2CN_C \quad (7-22)$$

em que Z = número de condutores do rotor

C = número de bobinas no rotor

N_C = número de espiras por bobina

Normalmente, uma bobina abrange 180 graus elétricos. Isso significa que quando um lado está debaixo do centro de um dado polo magnético, o outro lado está debaixo do centro de um polo de *polaridade oposta*. Os polos *físicos* podem estar em locais que não estão distanciados de 180 graus entre si, mas a polaridade do campo magnético é invertida completamente quando se desloca de um polo até o próximo. A relação entre o ângulo elétrico e o ângulo mecânico em uma dada máquina é dada por

$$\theta_e = \frac{P}{2} \theta_m \quad (7-23)$$

em que θ_e = ângulo elétrico, em graus

θ_m = ângulo mecânico, em graus

P = número de polos magnéticos da máquina

Se uma bobina abranger 180 graus elétricos, em todos os instantes as tensões nos condutores de ambos os lados da bobina serão exatamente as mesmas em valor com sentidos opostos. Uma bobina como essa é denominada *bobina de passo pleno*.

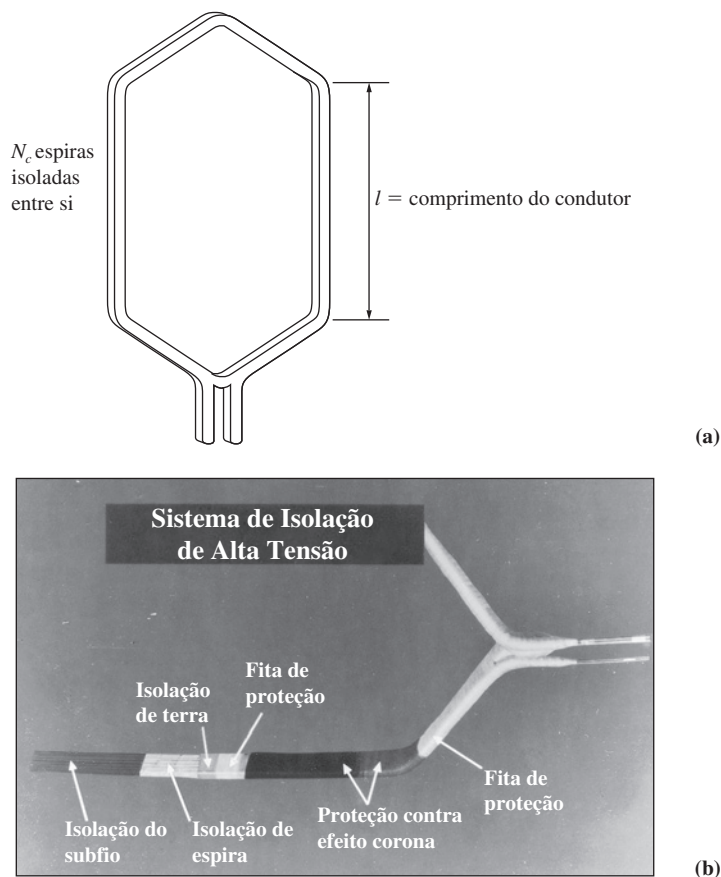


FIGURA 7-11

(a) O formato de uma bobina pré-moldada típica de rotor. (b) Um sistema típico de isolamento mostrando a isolação entre as espiras dentro de uma bobina. (Cortesia de General Electric Company.)

Algumas vezes, uma bobina é construída, abrangendo menos de 180 graus elétricos. Tal bobina é denominada *bobina de passo encurtado* ou *fracionário* e um enrolamento de rotor com bobinas de passo encurtado é denominado *enrolamento encurtado*. O grau de encurtamento de um enrolamento é descrito por um *fator de passo* p , que é definido pela equação

$$p = \frac{\text{ângulo elétrico da bobina}}{180^\circ} \times 100\% \quad (7-24)$$

Algumas vezes, um pequeno valor de encurtamento é usado nos enrolamentos CC do rotor para melhorar a comutação.

A maioria dos enrolamentos do rotor são *enrolamentos de camada dupla*, significando que lados de duas bobinas diferentes são inseridas em cada uma das ranhuras. Um lado de cada bobina estará no fundo de uma ranhura e o outro lado estará no topo de outra ranhura. Tal construção requer que as bobinas individuais sejam alojadas nas

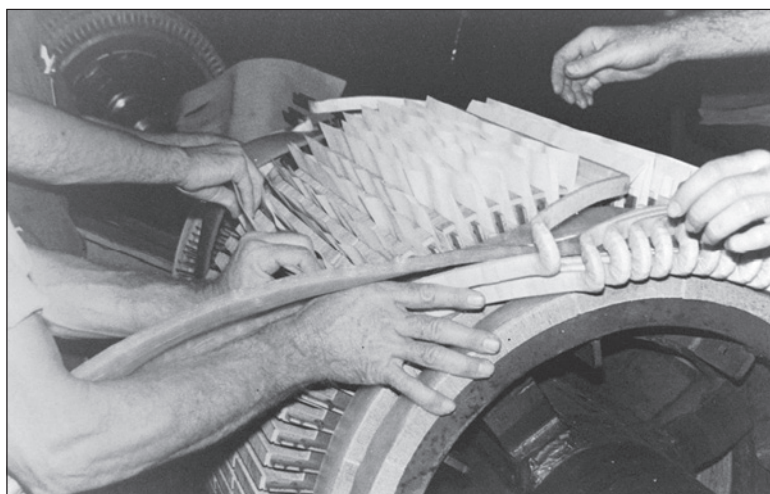


FIGURA 7-12

A instalação de bobinas de rotor pré-moldadas no rotor de uma máquina CC. (Cortesia de General Electric Company.)

ranhuras do rotor de acordo com um procedimento muito elaborado (veja a Figura 7-12). Um lado de cada bobina é colocado no fundo da sua ranhura e, depois que todos os lados inferiores estão no lugar, o outro lado de cada bobina é colocado no topo da sua ranhura. Dessa forma, todos os enrolamentos são entrelaçados, aumentando a resistência mecânica e a uniformidade da estrutura final.

Conexões com os segmentos do comutador

Quando os enrolamentos estiverem instalados nas ranhuras do rotor, eles deverão ser conectados aos segmentos do comutador. Há diversos modos de fazer essas ligações e as diversas configurações de enrolamentos que podem resultar apresentam diversas vantagens e desvantagens.

A distância (em número de segmentos) entre os segmentos do comutador aos quais os dois lados de uma bobina estão conectadas é denominada *passo do comutador* y_c . Se o lado final de uma bobina (ou um certo número de bobinas na construção ondulada) for conectado a um segmento do comutador que está à frente do segmento ao qual está conectado o lado inicial, então o enrolamento será denominado *enrolamento progressivo* (veja a Figura 7-13a). Se o lado final de uma bobina for ligado a um segmento do comutador que está atrás do segmento ao qual está conectado o lado inicial, o enrolamento será denominado *enrolamento regressivo* (veja a Figura 7-13b). Se todo o restante for idêntico, o sentido de rotação de um rotor de enrolamento progressivo será oposto ao sentido de rotação de um rotor de enrolamento regressivo.

Os enrolamentos do rotor (armadura) são classificados ainda de acordo com a *multiplicidade* de seus enrolamentos. Um enrolamento *simplex* (ou *simplex*) de rotor é constituído de um único enrolamento, completo e fechado, montado no rotor. Um enrolamento *duplo* (ou *duplex*) de rotor é constituído de *dois conjuntos completos e independentes* de enrolamentos. Se um rotor tiver um enrolamento duplo, e cada um dos enrolamentos estará associado a cada segmento alternado do comutador: um

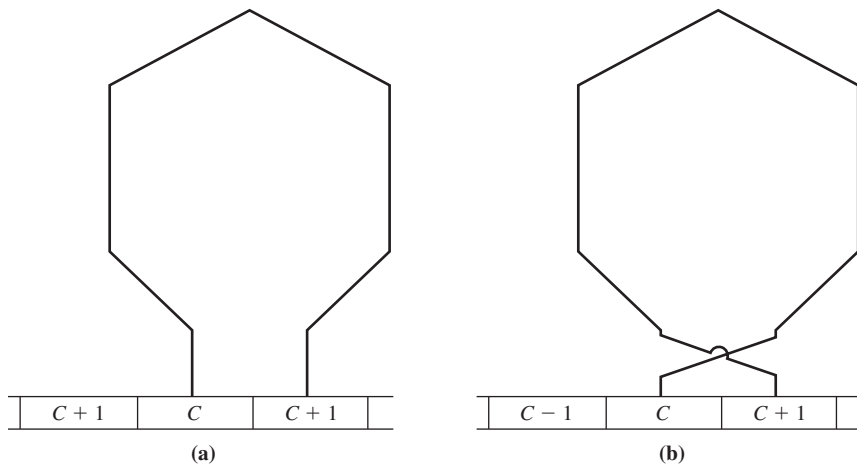


FIGURA 7-13

(a) Uma bobina em um enrolamento progressivo de rotor. (b) Uma bobina em um enrolamento regressivo de rotor.

enrolamento estará conectado aos segmentos 1, 3, 5, etc. e o outro estará ligado aos segmentos 2, 4, 6, etc. De modo similar, um enrolamento *triplo* (ou *triplex*) terá três conjuntos de enrolamentos completos e independentes. Cada enrolamento será conectado a cada terceiro segmento do comutador do rotor. Coletivamente, diz-se que todas as armaduras com mais de um conjunto de enrolamentos têm *enrolamentos múltiplos* (ou *multiplex*).

Finalmente, os enrolamentos de armadura são classificados de acordo com a sequência de suas conexões com os segmentos do comutador. Há duas sequências básicas de conexões dos enrolamentos da armadura – *enrolamentos imbricados* e *enrolamentos ondulados*. Além disso, há um terceiro tipo de enrolamento, denominado *enrolamento autoequalizado*, que combina enrolamentos imbricado e ondulado em um rotor simples. Esses enrolamentos serão examinados individualmente a seguir e suas vantagens e desvantagens serão discutidas.

O enrolamento imbricado

O tipo mais simples de construção de enrolamento utilizado nas máquinas CC modernas é o *enrolamento imbricado* ou *em série simples* (ou *simplex*). Um enrolamento imbricado é um enrolamento de rotor que consiste em bobinas que contêm uma ou mais espiras de fio com os dois lados de cada bobina ligados a *segmentos de comutador adjacentes* (Figura 7-13). Se o lado final da bobina estiver conectado ao segmento que se segue ao segmento ao qual está conectado o lado inicial da bobina, então se trata de um enrolamento imbricado progressivo e $y_c = 1$. Se o lado final da bobina estiver conectado ao segmento que antecede o segmento ao qual está conectado o lado inicial da bobina, então se trata de um enrolamento imbricado regressivo e $y_c = -1$. Uma máquina simples de dois polos com enrolamento imbricado é mostrada na Figura 7-14.

Uma característica interessante dos enrolamentos imbricados simples é que *há tantos caminhos de corrente em paralelo através da máquina quantos forem os polos*

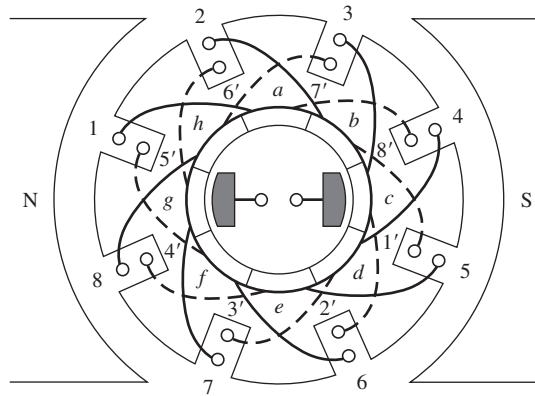


FIGURA 7-14
 Uma máquina CC simples de dois polos e enrolamento imbricado.

dessa máquina. Se C for o número de bobinas e de segmentos comutadores presentes no rotor e P for o número de polos da máquina, então haverá C/P bobinas em cada um dos P caminhos de corrente em paralelo que passam pela máquina. O fato de que há P caminhos de corrente também requer que haja tantas escovas na máquina quantos forem o número de polos para poder conectar todos os caminhos de corrente. Essa ideia está ilustrada no motor de quatro polos simples da Figura 7-15. Observe que, nesse motor, há quatro caminhos de corrente através do rotor, cada um com a mesma tensão. O fato de que há muitos caminhos de corrente em uma máquina de polos múltiplos torna o enrolamento imbricado uma escolha ideal para máquinas de tensão bastante baixa e corrente elevada, porque as altas correntes requeridas podem ser repartidas entre os diversos caminhos de corrente. Essa divisão de corrente permite que o tamanho dos condutores individuais do rotor permaneça razoável, mesmo quando a corrente total torna-se extremamente elevada.

Entretanto, o fato de que há muitos caminhos em paralelo passando através de uma máquina de múltiplos polos e enrolamento imbricado pode levar a um sério problema. Para compreender a natureza deste problema, examine a máquina de seis polos da Figura 7-16. Devido ao uso prolongado, houve um pequeno desgaste nos rolamentos dessa máquina e os condutores inferiores ficaram mais próximos de suas faces polares do que os condutores superiores. Como resultado, há uma tensão *maior* nos caminhos de corrente que passam pelos condutores que estão debaixo das faces polares inferiores do que nos caminhos que passam pelos condutores que estão debaixo das faces polares superiores. Como todos os caminhos estão ligados em paralelo, o resultado será uma corrente que circula saindo para fora de algumas das escovas da máquina e retornando em outras, como está mostrado na Figura 7-17. É desnecessário dizer que isso não é bom para a máquina. Como a resistência do enrolamento de um circuito de rotor é bastante baixa, a mínima diferença que existir entre as tensões dos caminhos em paralelo causará a circulação de correntes elevadas através das escovas e potencialmente poderá levar a sérios problemas de aquecimento.

O problema das correntes que circulam nos caminhos paralelos de uma máquina com quatro ou mais polos nunca poderá ser resolvido inteiramente, mas poderá ser reduzido em parte por meio de *enrolamentos equalizadores* ou de *equalização*.

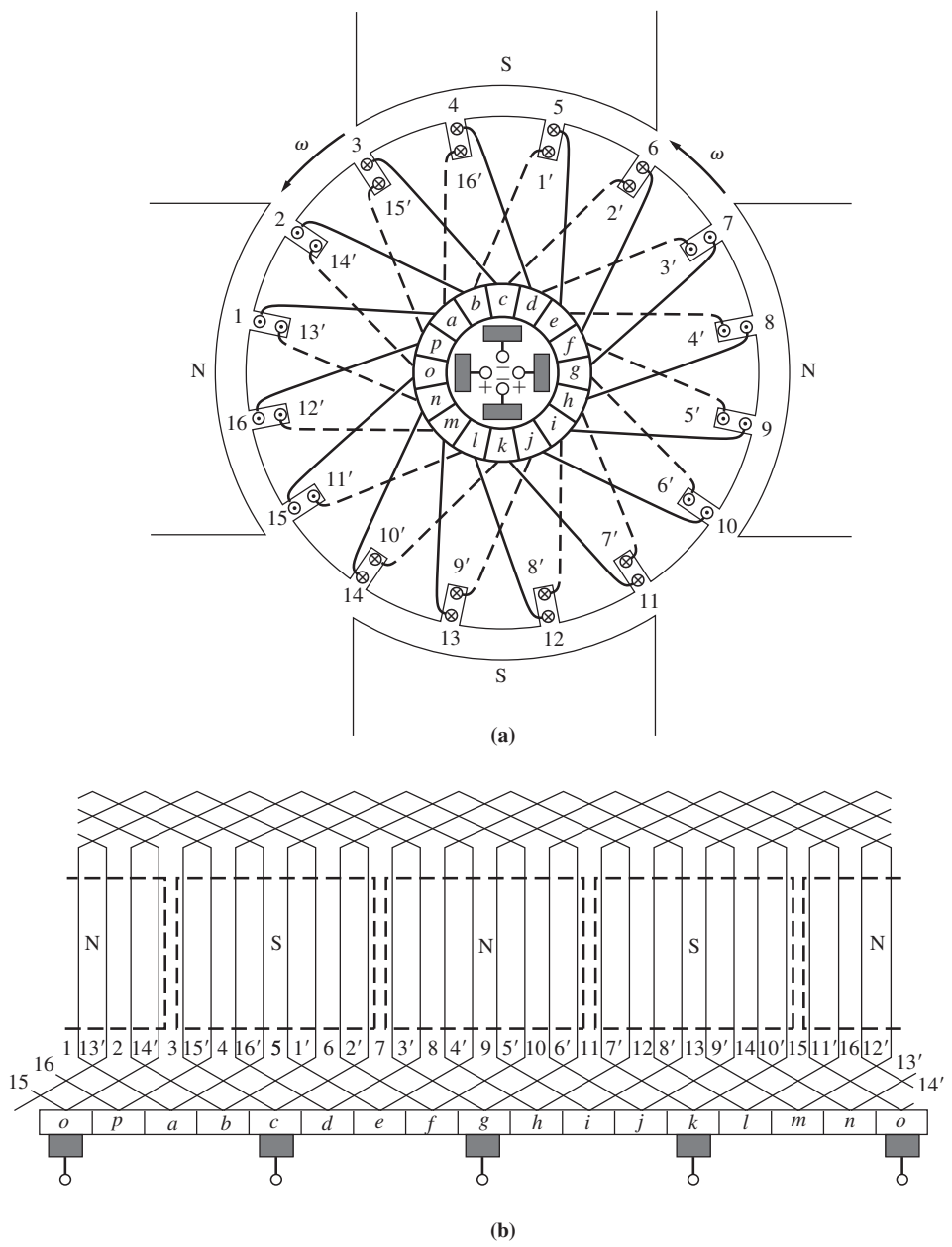


FIGURA 7-15
 (a) Um motor CC de quatro polos e enrolamento imbricado. (b) O diagrama de enrolamento do rotor desta máquina. Observe que cada enrolamento termina no segmento de comutador que está logo depois do segmento em que ele inicia. Esse é um enrolamento imbricado progressivo.

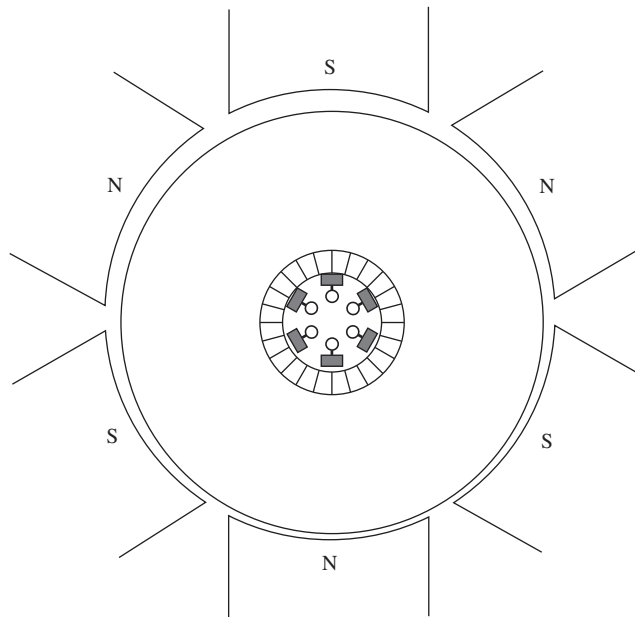


FIGURA 7-16

Um motor CC de seis polos mostrando os efeitos do desgaste dos rolamentos. Observe que o motor está ligeiramente mais próximo dos polos inferiores do que dos polos superiores.

Os equalizadores são barras localizadas no rotor de uma máquina CC de enrolamento imbricado que colocam em curto-circuito pontos de mesmo nível de tensão nos diferentes caminhos paralelos. O efeito desse curto-circuito é fazer com que qualquer corrente que venha a circular seja obrigada a fazê-lo nas pequenas seções dos enrolamentos que foram colocados em curto desse modo. Isso também evita que essa corrente circule através das escovas da máquina. Essas correntes em circulação chegam mesmo a corrigir parcialmente o desequilíbrio de fluxo que as originou inicialmente. Um equalizador para a máquina de quatro polos da Figura 7-15 é mostrado na Figura 7-18 e um equalizador para uma máquina CC de enrolamento imbricado de grande porte está mostrado na Figura 7-19.

Se um enrolamento imbricado for duplo (ou duplex), haverá dois conjuntos de enrolamentos completamente independentes alojados no rotor e cada segundo segmento do comutador estará conectado a um dos conjuntos. Portanto, uma bobina individual termina no segundo segmento do comutador após o segmento onde ela foi inicialmente conectada e $y_c = \pm 2$ (dependendo se o enrolamento é progressivo ou regressivo). Como cada conjunto de enrolamentos tem tantos caminhos de corrente quanto há polos na máquina, então em um enrolamento imbricado duplo haverá o dobro de caminhos de corrente quanto o número polos na máquina.

Em geral, em um enrolamento imbricado de multiplicidade m , o passo do comutador y_c é

$$\boxed{y_c = \pm m} \quad \text{enrolamento imbricado} \quad (7-25)$$

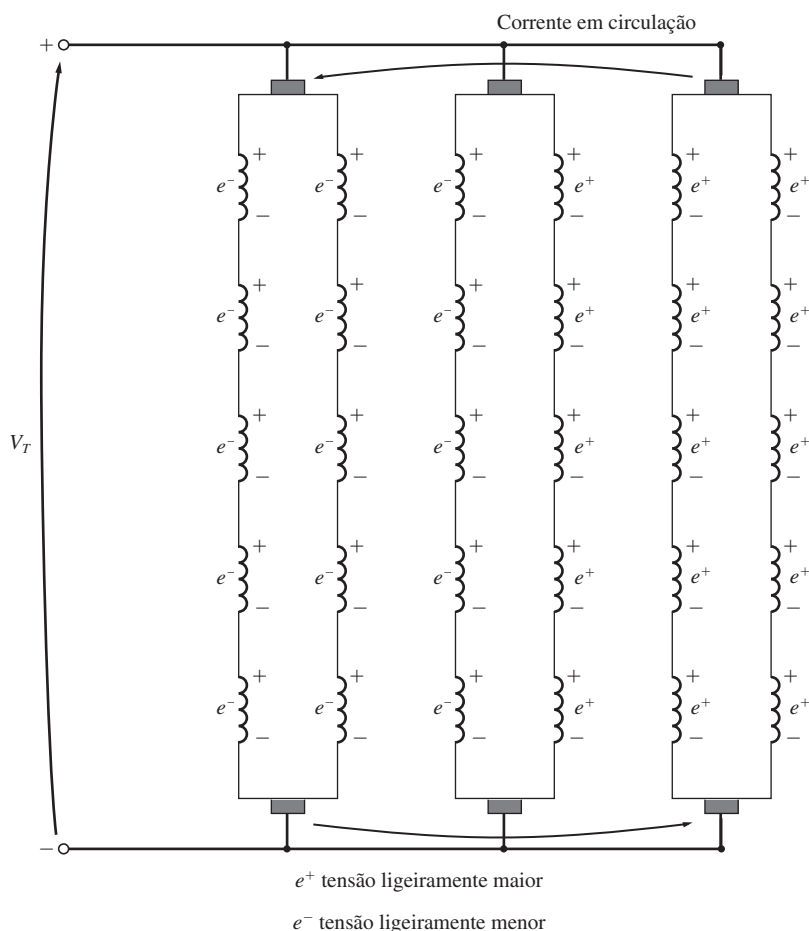


FIGURA 7-17

As tensões nos condutores do rotor da máquina da Figura 7-16 são desiguais, produzindo fluxo de correntes que circulam por suas escovas.

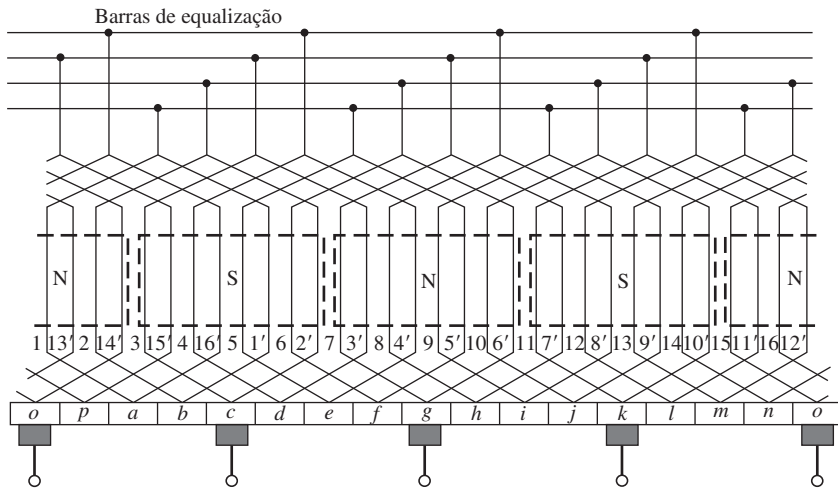
e o número de caminhos de corrente da máquina é

$$a = mP \quad \text{enrolamento imbricado} \quad (7-26)$$

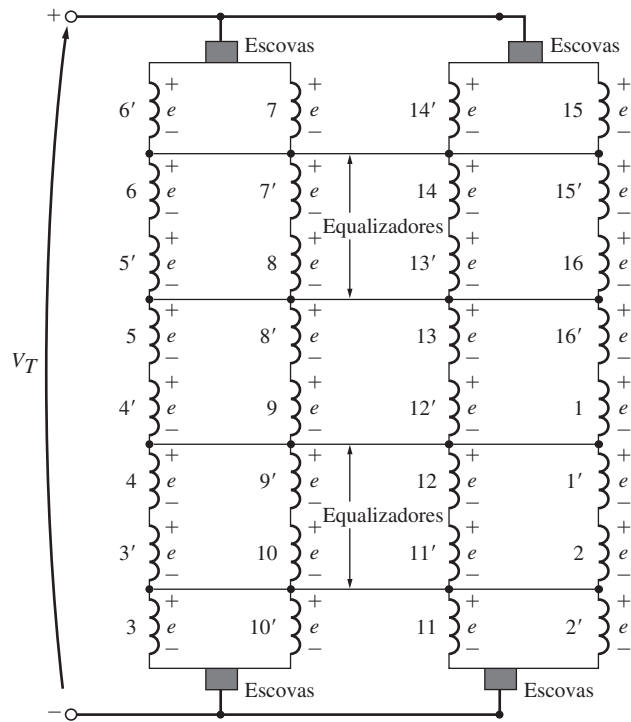
em que a = número de caminhos de corrente no rotor
 m = multiplicidade do enrolamento (1, 2, 3, etc.)
 p = número de polos da máquina

O enrolamento ondulado

O *enrolamento ondulado* ou *em série* é uma forma alternativa de conectar as bobinas do rotor aos segmentos do comutador. A Figura 7-20 mostra uma máquina simples de quatro polos com um enrolamento ondulado simples. Nesse enrolamento, cada se-



(a)



(b)

FIGURA 7-18

(a) Uma conexão com barras de equalização para a máquina de quatro polos da Figura 7-15.
 (b) Um diagrama de tensão da máquina mostra os pontos colocados em curto pelos equalizadores.

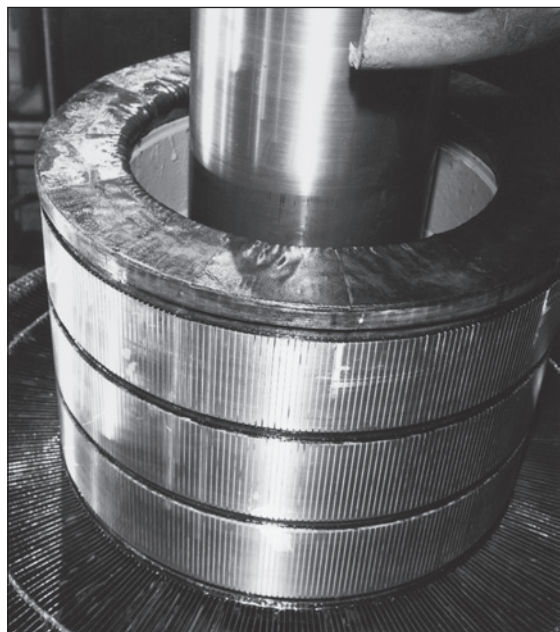


FIGURA 7-19

Vista em detalhe do comutador de uma máquina CC de enrolamento imbricado de grande porte. Os equalizadores estão montados no pequeno anel exatamente à frente dos segmentos do comutador. (Cortesia de General Electric Company.)

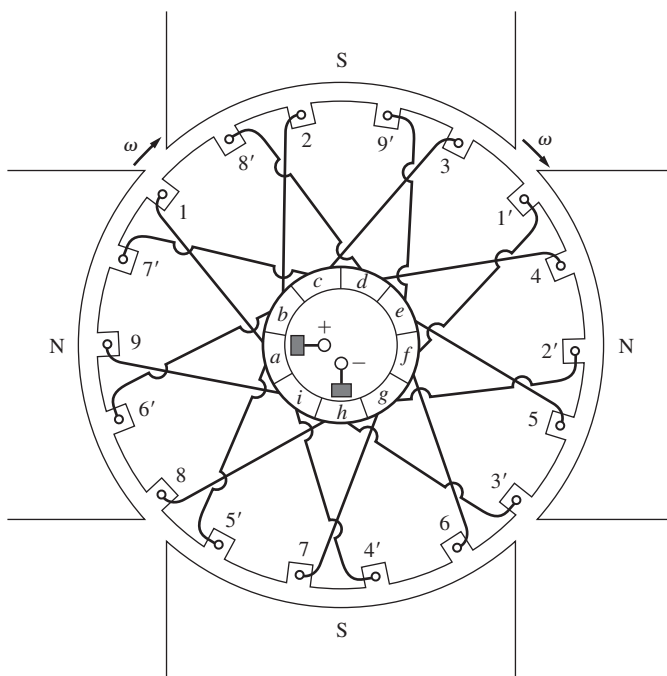


FIGURA 7-20

Uma máquina CC simples de quatro polos e enrolamento ondulado.

gunda bobina do rotor termina com uma conexão a um segmento do comutador que é adjacente ao segmento ligado ao início da primeira bobina. Portanto, entre segmentos adjacentes do comutador, *há duas bobinas em série*. Além disso, como cada par de bobinas entre segmentos adjacentes tem um lado debaixo de cada face polar, todas as tensões de saída serão a soma dos efeitos de todos os polos, não podendo ocorrer desequilíbrios de tensão.

A terminação da segunda bobina pode ser conectada ao segmento que está após ou antes do segmento no qual inicia a primeira bobina. Se a segunda bobina for conectada ao segmento posterior à primeira bobina, o enrolamento será progressivo ou, se ela for conectada ao segmento anterior à primeira bobina, o enrolamento será regressivo.

Em geral, se houver P polos na máquina, haverá $P/2$ bobinas em série entre segmentos adjacentes do comutador. Se a bobina de número $P/2$ for conectada ao segmento posterior à primeira bobina, o enrolamento será progressivo e, se for conectada ao segmento anterior à primeira bobina, o enrolamento será regressivo.

Em um enrolamento ondulado simples, há apenas dois caminhos de corrente. Há $C/2$ ou metade dos enrolamentos em cada caminho de corrente. As escovas dessa máquina estarão separadas entre si por um passo polar pleno.

Qual é o passo do comutador para um enrolamento ondulado? A Figura 7-20 mostra um enrolamento progressivo de nove bobinas e o final de uma bobina ocorre cinco segmentos além do seu ponto de partida. Em um enrolamento ondulado regressivo, o final da bobina ocorre quatro segmentos antes do seu ponto de partida. Portanto, o final de uma bobina em um enrolamento ondulado de quatro polos deve ser conectada exatamente antes ou após o ponto a meio caminho sobre o círculo desde seu ponto de partida.

A expressão geral que dá o passo do comutador para qualquer enrolamento ondulado simples é

$$y_c = \frac{2(C \pm 1)}{P} \quad \text{ondulado simplex} \quad (7-27)$$

em que C é o número de bobinas no rotor e P é o número de polos da máquina. O sinal positivo está associado aos enrolamentos progressivos e o sinal negativo, aos enrolamentos regressivos. Um enrolamento ondulado simples está mostrado na Figura 7-21.

Como há apenas dois caminhos de corrente através de um rotor com enrolamento ondulado simples, serão necessárias apenas duas escovas para coletar a corrente. Isso ocorre porque os segmentos que estão passando por comutação ligam os pontos de mesma tensão debaixo de todas as faces polares. Se desejado, mais escovas poderão ser acrescentadas em pontos distanciados de 180 graus elétricos porque estão no mesmo potencial e estão conectadas entre si pelos fios que passam por comutação na máquina. Escovas extras são usualmente acrescentadas a uma máquina de enrolamento ondulado, mesmo que isso não seja necessário, porque elas reduzem a quantidade de corrente a ser coletada por um dado conjunto de escovas.

Enrolamentos ondulados são bem adequados à construção de máquinas CC de tensão mais elevada, porque as bobinas em série entre os segmentos do comutador permitem produzir uma tensão elevada mais facilmente do que com enrolamentos imbricados.

Um enrolamento ondulado múltiplo (ou multiplex) é um enrolamento com múltiplos conjuntos *independentes* de enrolamentos ondulados no rotor. Esses conjuntos

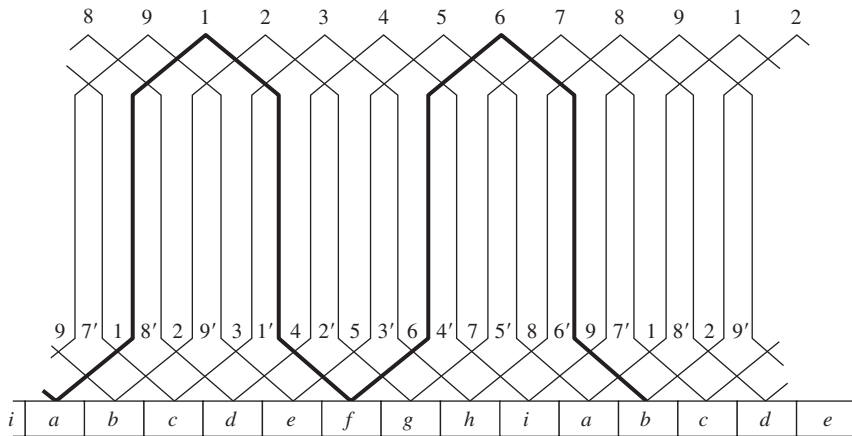


FIGURA 7-21
 O diagrama de enrolamento do rotor da máquina da Figura 7-20. Observe que o final de cada segunda bobina em série conecta-se ao segmento posterior do início da primeira bobina. Esse é um enrolamento ondulado progressivo.

extras de enrolamentos têm dois caminhos de corrente cada, de modo que o número de caminhos de corrente em um enrolamento ondulado múltiplo é

$$a = 2m \quad \text{ondulado multiplex} \quad (7-28)$$

O enrolamento autoequalizado

O *enrolamento autoequalizado* ou *perna de rã* tem esse nome devido ao formato de suas bobinas, como está mostrado na Figura 7-22. Ele consiste em um enrolamento imbricado combinado com um enrolamento ondulado.

Os equalizadores de um enrolamento imbricado comum são conectados em pontos de mesma tensão nos enrolamentos. Os enrolamentos ondulados ligam-se a pontos que têm basicamente a mesma tensão debaixo de faces polares sucessivas de mesma polaridade, sendo os mesmos pontos em que os equalizadores se conectam entre si. Um enrolamento autoequalizador combina um enrolamento imbricado com um enrolamento ondulado, de modo que os enrolamentos ondulados podem funcionar como equalizadores para o enrolamento imbricado.

O número de caminhos de corrente presentes em um enrolamento autoequalizado é

$$a = 2Pm_{\text{imbr}} \quad \text{enrolamento equalizado} \quad (7-29)$$

em que P é o número de polos da máquina e m_{imbr} é a multiplicidade do enrolamento imbricado.

EXEMPLO 7-2 Descreva a configuração do enrolamento do rotor da máquina de quatro polos da Seção 7.2.

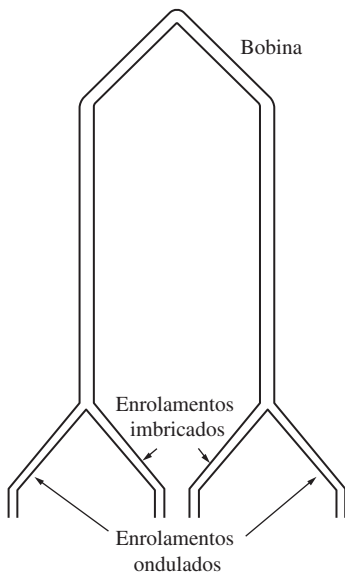


FIGURA 7-32
Uma bobina de enrolamento autoequalizado ou perna de rã.

Solução

A máquina descrita na Seção 7.2 tem quatro bobinas, cada uma com uma espira, resultando um total de oito condutores. Seu enrolamento é imbricado progressivo.

7.4 PROBLEMAS DE COMUTAÇÃO EM MÁQUINAS REAIS

O processo de comutação, como foi descrito nas Seções 7.2 e 7.3, não é tão simples na prática como parece na teoria, devido a dois fatores principais que ocorrem no mundo real perturbando-o:

1. Reação de armadura
2. Tensões Ldi/dt

Esta seção explora a natureza desses problemas e as soluções adotadas para diminuir seus efeitos.

Reação de armadura

Se os enrolamentos do campo magnético de uma máquina CC forem ligados a uma fonte de alimentação e o rotor da máquina for girado por uma fonte externa de potência mecânica, será induzida uma tensão nos condutores do rotor. Essa tensão será retificada convertendo-se em uma saída CC pela ação do comutador da máquina.

Agora, conecte uma carga aos terminais da máquina e uma corrente circulará pelos enrolamentos de sua armadura. Essa corrente produzirá um campo magnético próprio, que irá distorcer o campo magnético original dos polos da máquina. Essa distorção do fluxo de uma máquina quando a carga é aumentada é denominada *reação de armadura*. Ela causa dois problemas sérios nas máquinas CC reais.

O primeiro problema causado pela reação de armadura é o *deslocamento do plano neutro*. O *plano neutro magnético* (ou simplesmente *neutro magnético*) é defi-

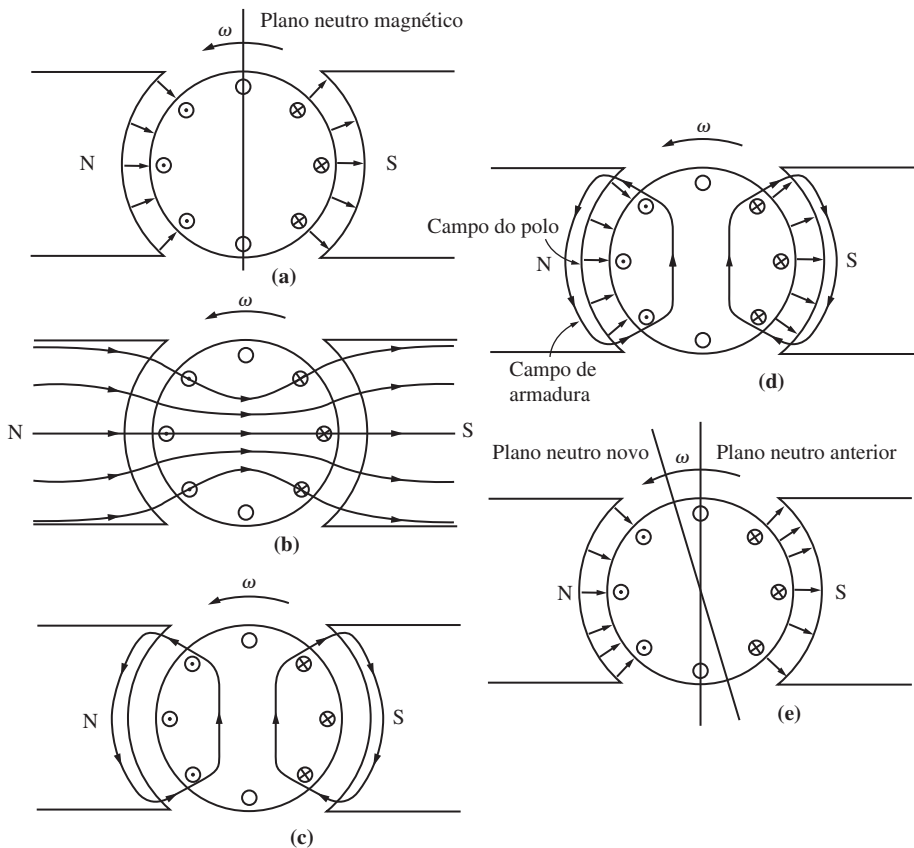


FIGURA 7-23

O desenvolvimento da reação de armadura em um gerador CC. (a) Inicialmente, o fluxo polar está uniformemente distribuído e o plano magnético neutro é vertical; (b) o efeito do entreferro na distribuição do fluxo polar; (c) o campo magnético resultante da armadura quando uma carga é conectada à máquina; (d) os fluxos do rotor e dos polos estão mostrados, indicando os pontos onde eles se somam e se subtraem; (e) o fluxo resultante debaixo dos polos. O plano neutro deslocou-se no sentido do movimento.

nido como o plano no interior da máquina onde a velocidade dos condutores do rotor é exatamente paralela às linhas do fluxo magnético, de modo que e_{ind} nos condutores no plano é exatamente zero.

Para compreender o problema do deslocamento do plano neutro, examine a Figura 7-23. A Figura 7-23a mostra uma máquina CC de dois polos. Observe que o fluxo está distribuído uniformemente debaixo das faces dos polos. Os enrolamentos mostrados do rotor, no caso dos condutores debaixo da face do polo norte, têm tensões geradas apontando para fora da página. No caso dos condutores debaixo da face do polo sul, as tensões apontam para dentro da página. O plano neutro dessa máquina é exatamente vertical.

Agora, suponha que uma carga seja conectada à máquina de modo que ela atue como um gerador. Nesse caso, a corrente circulará para fora do terminal positivo do

gerador. Assim, a corrente irá para fora da página nos condutores debaixo da face do polo norte e para dentro da página nos condutores debaixo da face do polo sul. Esse fluxo de corrente é responsável pela produção de um campo magnético nos enrolamentos do rotor, como está mostrado na Figura 7-23c. Tal campo magnético afeta o campo magnético original dos polos que inicialmente produziu a tensão do gerador. Em alguns lugares debaixo das superfícies dos polos, o fluxo do polo sofre subtração e em outros lugares há um acréscimo. O resultado global é que o fluxo magnético no entreferro da máquina é distorcido como está mostrado nas Figuras 7-23d e 7-23e. Observe que no rotor houve deslocamento do local onde a tensão induzida em um condutor seria zero (o plano neutro).

Para o gerador da Figura 7-23, o plano neutro magnético foi deslocado no sentido de rotação do rotor. Se essa máquina fosse um motor, a corrente de seu rotor seria invertida e o fluxo se concentraria nos cantos opostos aos mostrados na figura. Como resultado, o plano neutro magnético iria se deslocar no sentido oposto ao ilustrado na figura.

Em geral, no caso de um gerador, o plano neutro desloca-se no sentido do movimento e no sentido oposto no caso de um motor. Além disso, o valor do deslocamento dependerá do valor da corrente do rotor e, conseqüentemente, da carga da máquina.

Afinal, qual é o problema com o deslocamento do plano neutro? É simplesmente o seguinte: o comutador deve colocar em curto os segmentos do comutador exatamente no momento em que a tensão sobre eles é zero. Se as escovas forem ajustadas para colocar em curto os condutores no plano vertical, então a tensão entre os segmentos será realmente zero *até que a máquina seja carregada*. Quando a máquina recebe a carga, o plano neutro desloca-se e as escovas colocam em curto segmentos com uma tensão finita neles. O resultado é um fluxo de corrente circulando entre os segmentos em curto e também a presença de grandes faíscas nas escovas quando o caminho da corrente é interrompido no instante em que uma escova deixa um segmento. O resultado final é a formação de *arcos e faiscamento nas escovas*. Trata-se de um problema muito sério, porque leva à redução drástica da vida útil das escovas, à corrosão dos segmentos do comutador e a um grande aumento dos custos de manutenção. Observe que esse problema não pode ser resolvido nem mesmo colocando as escovas sobre o plano neutro de plena carga, porque então haveria faíscas quando não houvesse carga, a vazio.

Em casos extremos, o deslocamento do plano neutro pode mesmo levar ao surgimento de um *arco elétrico* nos segmentos do comutador próximo das escovas. O ar junto às escovas de uma máquina está normalmente ionizado como resultado de seu faiscamento. Um arco ocorre quando a tensão entre segmentos de comutador adjacentes torna-se suficientemente elevada para manter um arco no ar ionizado acima deles. Se ocorrer um arco, poderá haver o derretimento da superfície do comutador.

O segundo problema importante causado pela reação de armadura é denominado *enfraquecimento de fluxo*. Para compreender esse problema, consulte a curva de magnetização mostrada na Figura 7-24. A maioria das máquinas opera com densidade de fluxo próximo do ponto de saturação. Portanto, nos locais das superfícies dos polos onde a força magnetomotriz do rotor soma-se à força magnetomotriz dos polos, ocorre apenas um pequeno incremento de fluxo. No entanto, nos locais das superfícies dos polos onde a força magnetomotriz do rotor subtrai-se da força magnetomotriz dos polos, há uma grande diminuição no fluxo. O resultado líquido é que *o fluxo total médio debaixo da face inteira do polo é diminuído* (veja a Figura 7-25).

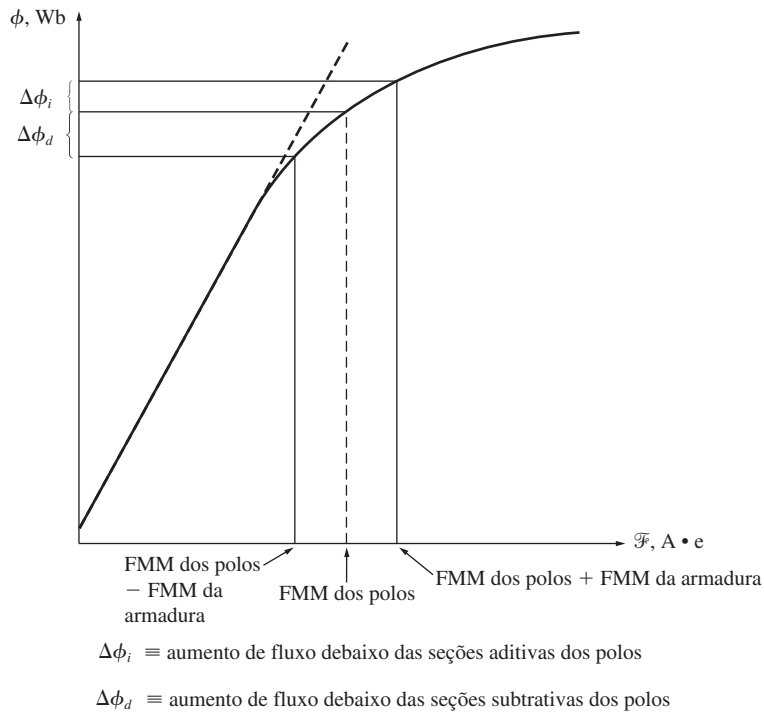


FIGURA 7-24

Uma típica curva de magnetização mostra os efeitos da saturação dos polos onde as forças magnetomotrices da armadura e dos polos somam-se.

O enfraquecimento de fluxo causa problemas tanto em geradores como em motores. Nos geradores, o efeito do enfraquecimento de fluxo é simplesmente a redução da tensão fornecida pelo gerador para qualquer carga dada. Nos motores, o efeito pode ser mais sério. Como os primeiros exemplos deste capítulo mostraram, quando o fluxo do motor é diminuído, sua velocidade aumenta. No entanto, o aumento de velocidade de um motor pode elevar sua carga, resultando em mais enfraquecimento de fluxo. É possível que alguns motores CC em derivação cheguem a uma situação de descontrole como resultado do enfraquecimento de fluxo. Nessa condição, o motor simplesmente permanece aumentando a velocidade até ser desligado da linha de potência ou se destruir.

Tensões $L di/dt$

O segundo problema importante é a tensão $L di/dt$ que ocorre nos segmentos do comutador que são colocados em curto pelas escovas, algumas vezes denominado *pico indutivo de tensão*. Para compreender esse problema, examine a Figura 7-26. Essa figura representa uma série de segmentos de comutador e os condutores conectados entre eles. Assumindo que a corrente na escova é 400 A, então a corrente em cada caminho é 200 A. Observe que, quando um segmento de comutador é colocado em

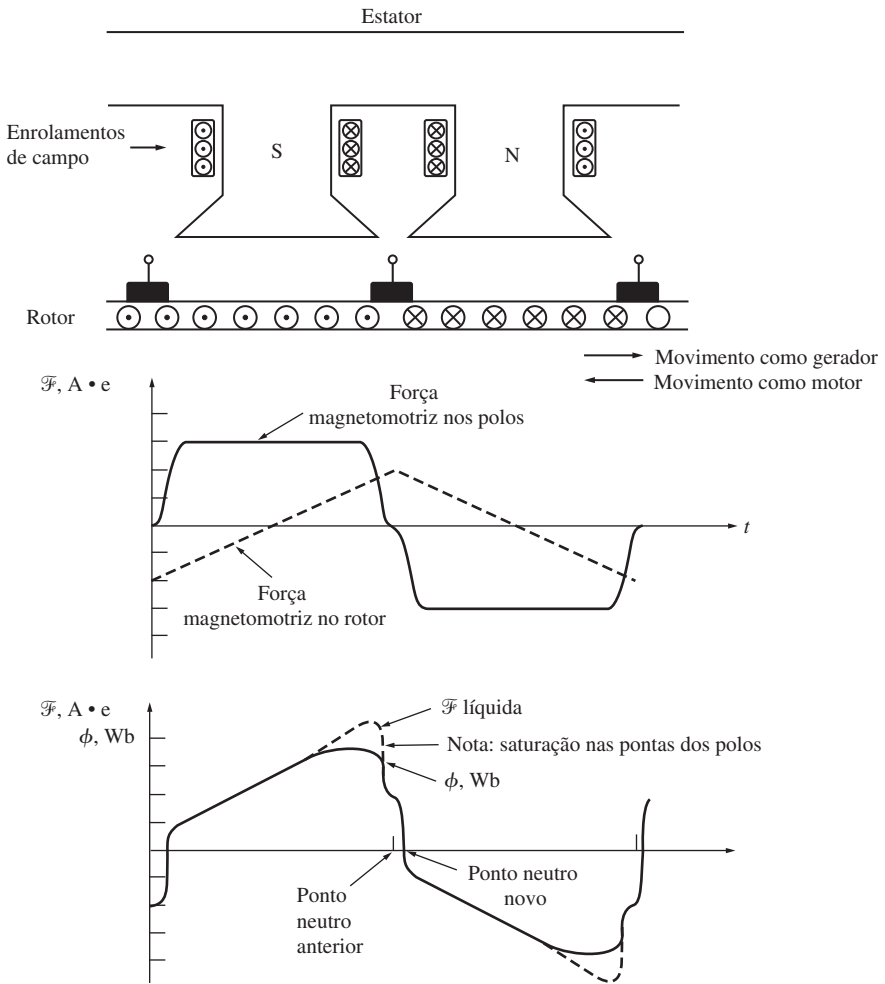


FIGURA 7-25

O fluxo e a força magnetomotriz debaixo das faces dos polos de uma máquina CC. Nos pontos onde as forças magnetomotrizes subtraem-se, o fluxo acompanha de perto a força magnetomotriz líquida no ferro, mas, nos pontos onde as forças magnetomotrizes adicionam-se, a saturação limita o fluxo total presente. Observe também que o ponto neutro do rotor deslocou-se.

curto, a corrente nesse segmento deve ser invertida. Com que rapidez deve ocorrer essa inversão? Assumindo que a máquina está girando a 800 rpm e que há 50 segmentos de comutador (um número razoável para um motor típico), cada segmento de comutador move-se debaixo de uma escova e a deixa em $t = 0,0015$ s. Portanto, a taxa de variação de corrente em relação ao tempo na espira em curto deve ser *em média*

$$\frac{di}{dt} = \frac{400 \text{ A}}{0,0015 \text{ s}} = 266.667 \text{ A/s} \quad (7-30)$$

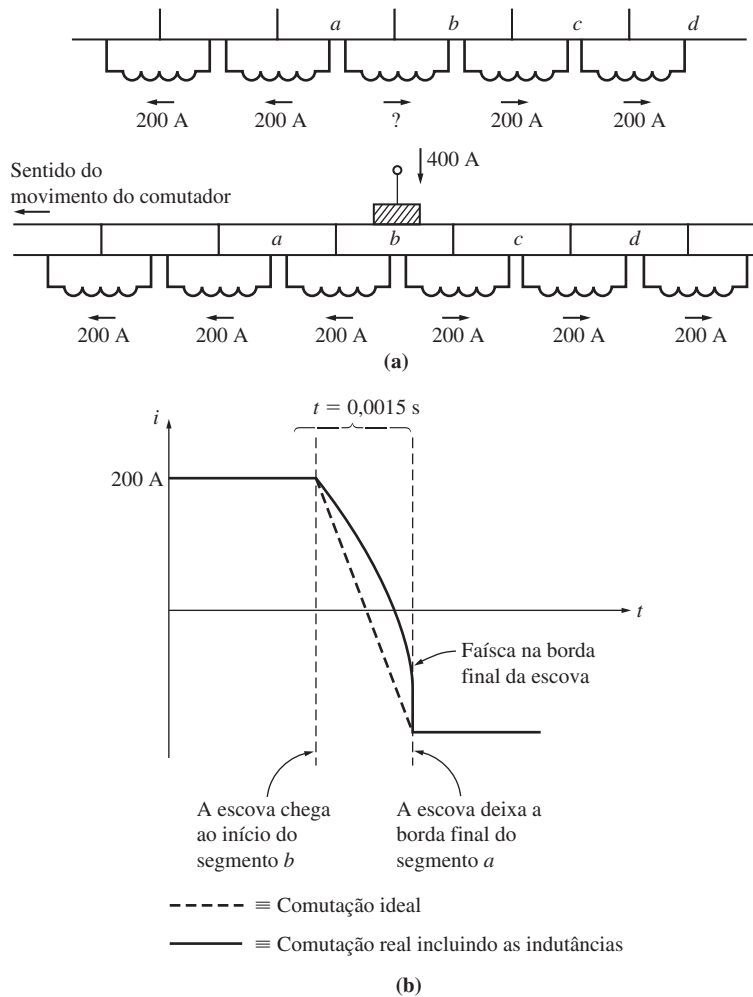


FIGURA 7-26

(a) A inversão do fluxo de corrente em uma bobina que está passando por um processo de comutação. Observe que o sentido da corrente na bobina entre os segmentos a e b deve ser invertido enquanto a escova coloca em curto os dois segmentos do comutador. (b) A inversão da corrente em função do tempo em uma bobina que está passando por comutação, tanto para a comutação ideal como para a real. A indutância da bobina foi levada em consideração.

Mesmo com uma indutância mínima na espira, um pico indutivo de tensão $v = L di/dt$ muito significativo será induzido no segmento de comutador em curto. Naturalmente, essa tensão elevada causa faiscamento nas escovas da máquina, resultando nos mesmos problemas de formação de arco que eram causados pelo deslocamento do plano neutro.

Soluções para os problemas de comutação

Três abordagens foram desenvolvidas para corrigir parcial ou totalmente os problemas de reação de armadura e tensões $L di/dt$:

1. Deslocamento de escovas
2. Polos de comutação ou interpolos
3. Enrolamentos de compensação

Cada uma dessas técnicas será explicada a seguir, juntamente com suas vantagens e desvantagens.

DESLOCAMENTO DE ESCOVAS. Historicamente, as primeiras tentativas de aperfeiçoar o processo de comutação das máquinas CC reais começaram com o objetivo de deter o faiscamento nas escovas causado pelos deslocamentos do plano neutro e efeitos $L di/dt$. A primeira abordagem adotada pelos projetistas de máquinas era simples: se o plano neutro da máquina desloca-se, então por que não deslocar também as escovas para interromper o faiscamento? Certamente, parecia uma boa ideia, mas há diversos problemas sérios associados. De um lado, o plano neutro move-se com qualquer alteração de carga e o sentido de deslocamento é invertido quando a máquina passa do modo de operação como motor para o modo como gerador. Portanto, alguém tinha que ajustar as escovas a cada vez que a carga da máquina mudava. Além disso, se de um lado o deslocamento das escovas pode interromper o faiscamento nas escovas, de outro, ele na realidade *agrava* o efeito do enfraquecimento de fluxo causado pela reação de armadura da máquina. Isso é verdadeiro devido a dois efeitos:

1. Agora, a força magnetomotriz do rotor tem uma componente vetorial que se opõe à força magnetomotriz dos polos (veja a Figura 7-27).
2. A alteração na distribuição da corrente de armadura faz com que o fluxo concentre-se ainda mais nas partes saturadas das faces polares.

Outra abordagem ligeiramente diferente adotada algumas vezes consistia em ajustar as escovas em uma posição conciliatória (uma que não causasse faiscamento a, digamos, dois terços da carga total). Nesse caso, o motor faiscava a vazio e menos a plena carga. Se ele passasse a maior parte de sua vida operando em torno de dois terços da plena carga, então o faiscamento seria minimizado. Naturalmente, tal máquina não poderia ser usada de jeito nenhum como gerador – o faiscamento teria sido horrível.

Em torno de 1910, o método de deslocamento de escovas já era obsoleto. Hoje, esse método é usado apenas com pequenas máquinas que sempre operam como motores. Faz-se desse modo porque soluções melhores para esse problema simplesmente não são econômicas no caso de motores de porte tão pequeno.

POLOS DE COMUTAÇÃO OU INTERPOLOS. Devido às desvantagens recém apontadas e especialmente devido à exigência de ser necessária uma pessoa para ajustar as posições das escovas das máquinas quando suas cargas estiverem mudando, outra solução foi desenvolvida para o problema do faiscamento. A ideia básica por trás dessa nova abordagem é que, se a tensão nos condutores que estão sofrendo comutação puder

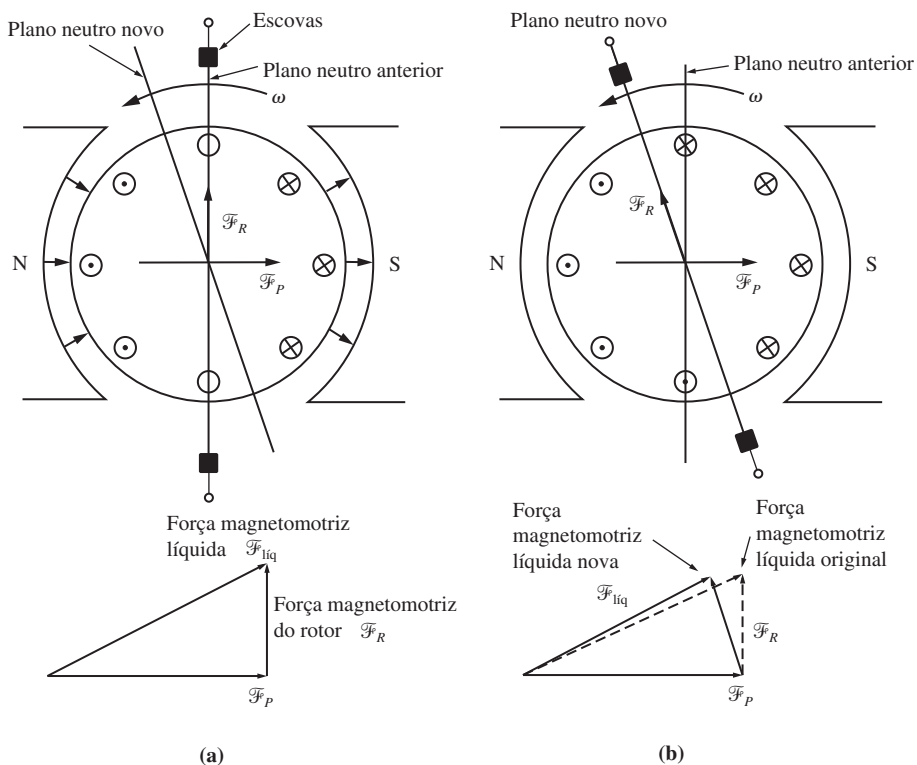


FIGURA 7-27

(a) A força magnetomotriz líquida em uma máquina CC quando as suas escovas estão no plano neutro vertical. (b) A força magnetomotriz líquida em uma máquina CC quando as suas escovas estão sobre o plano neutro deslocado. Observe que agora uma componente da força magnetomotriz de armadura está *diretamente em oposição* à força magnetomotriz dos polos e que a força magnetomotriz líquida da máquina foi reduzida.

ser tornada zero, então não haverá faiscamento nas escovas. Para conseguir isso, pequenos polos, denominados *polos de comutação* ou *interpolos*, são colocados a meio caminho entre os polos principais. Esses polos de comutação estão localizados *diretamente sobre* os condutores que passam pela comutação. Fornecendo um fluxo pelo uso dos polos de comutação, será possível cancelar exatamente a tensão nas bobinas que estão passando por comutação. Se esse cancelamento for exato, não haverá faiscamento nas escovas.

Fora isso, os polos de comutação não alteram de nenhum outro modo o funcionamento da máquina. Eles são tão pequenos que afetam apenas os poucos condutores que estão em vias de passar pela comutação. Observe que a *reação de armadura* debaixo das faces dos polos principais não é afetada, porque não chegam a tanto os efeitos dos polos de comutação. Isso significa que o enfraquecimento de fluxo na máquina não é afetado pelos polos de comutação.

Como se dá o cancelamento da tensão nos segmentos do comutador para todos os valores de carga? Isso é feito simplesmente ligando em *série* os enrolamentos dos

interpolos com os enrolamentos do rotor, como mostra a Figura 7-28. À medida que a carga e a corrente do rotor aumentam, o deslocamento do plano neutro e os efeitos $L di/dt$ também crescem. Devido a esses dois efeitos, há uma elevação na tensão dos condutores que estão em comutação. Entretanto, o fluxo de interpolo também aumenta, induzindo nos condutores uma tensão maior que se opõe à tensão produzida pelo deslocamento do plano neutro. O resultado líquido é que seus efeitos cancelam-se dentro de um largo intervalo de valores de carga. Observe que os interpolos funcionam corretamente quando a máquina está funcionando como motor ou como gerador. Isso ocorre porque, quando a máquina muda o funcionamento de motor para gerador, há inversão do sentido da corrente nos interpolos e também no rotor. Portanto, os efeitos da tensão continuam se cancelando.

De que polaridade deve ser o fluxo nos interpolos? Nos condutores que estão em comutação, os interpolos devem induzir uma tensão *oposta* à tensão causada pelo deslocamento do plano neutro e pelos efeitos $L di/dt$. No caso de um gerador, o plano neutro desloca-se no sentido da rotação. Isso significa que os condutores em comutação têm a mesma polaridade de tensão que o polo anterior que acaba de ficar para trás (veja a Figura 7-29). Para se opor a essa tensão, os interpolos devem ter fluxo oposto, ou seja, o fluxo do polo seguinte. Em um motor, entretanto, o plano neutro desloca-se no sentido oposto à rotação. Desse modo, os condutores que estão em comutação têm o mesmo fluxo que o polo do qual eles estão se aproximando. Para se opor a essa tensão, os interpolos devem ter a mesma polaridade que o polo principal anterior que está se afastando e ficando para trás. Portanto,

1. Em um gerador, os interpolos devem ter a mesma polaridade que o polo principal seguinte que se aproxima.

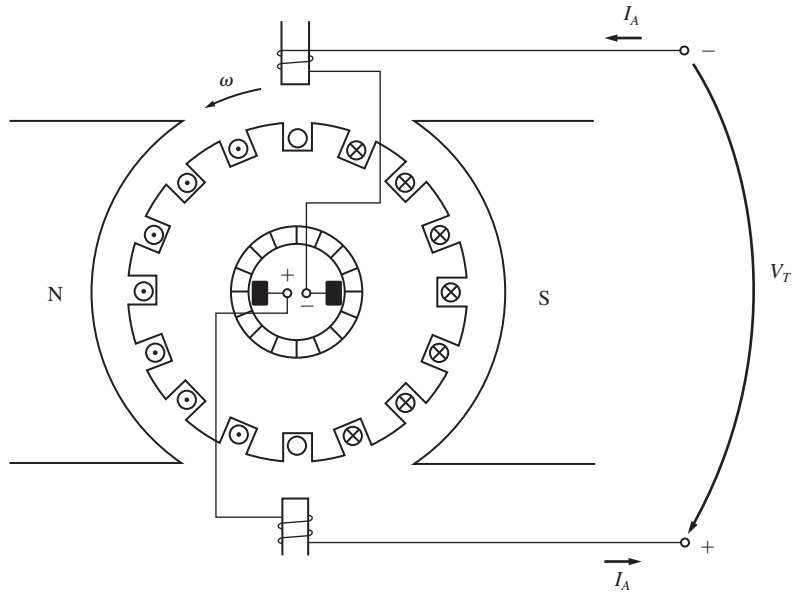


FIGURA 7-28
Uma máquina CC com interpolos.

2. Em um motor, os interpolos devem ter a mesma polaridade que o polo principal anterior que se afasta.

O uso de polos de comutação ou interpolos é muito comum, porque corrigem os problemas de faiscamento das máquinas CC a um custo bem baixo. São quase sempre encontrados em máquinas CC de 1 HP ou mais. É importante ter em conta, entretanto, que eles não alteram *nada* em relação à distribuição de fluxo debaixo das faces polares. Assim, o problema do enfraquecimento de fluxo continua presente. Em relação ao faiscamento, na maioria dos motores de porte médio de uso geral, esse problema é corrigido pelo uso de interpolos e, em relação ao enfraquecimento de fluxo, simplesmente convive-se com seus efeitos.

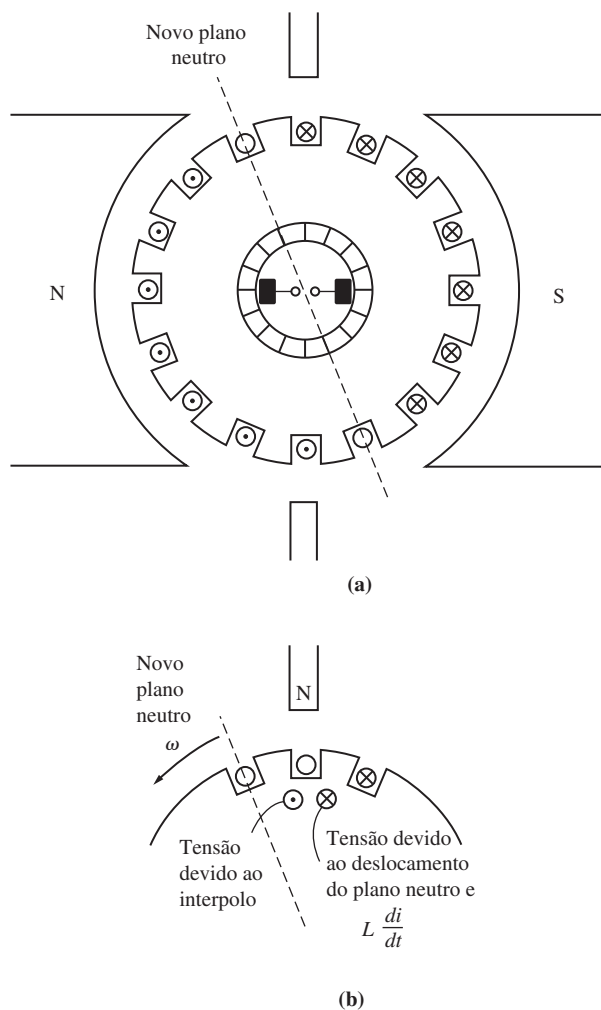


FIGURA 7-29

Determinação da polaridade de um interpolo. O fluxo do interpolo deve produzir uma tensão que se opõe à tensão existente no condutor.

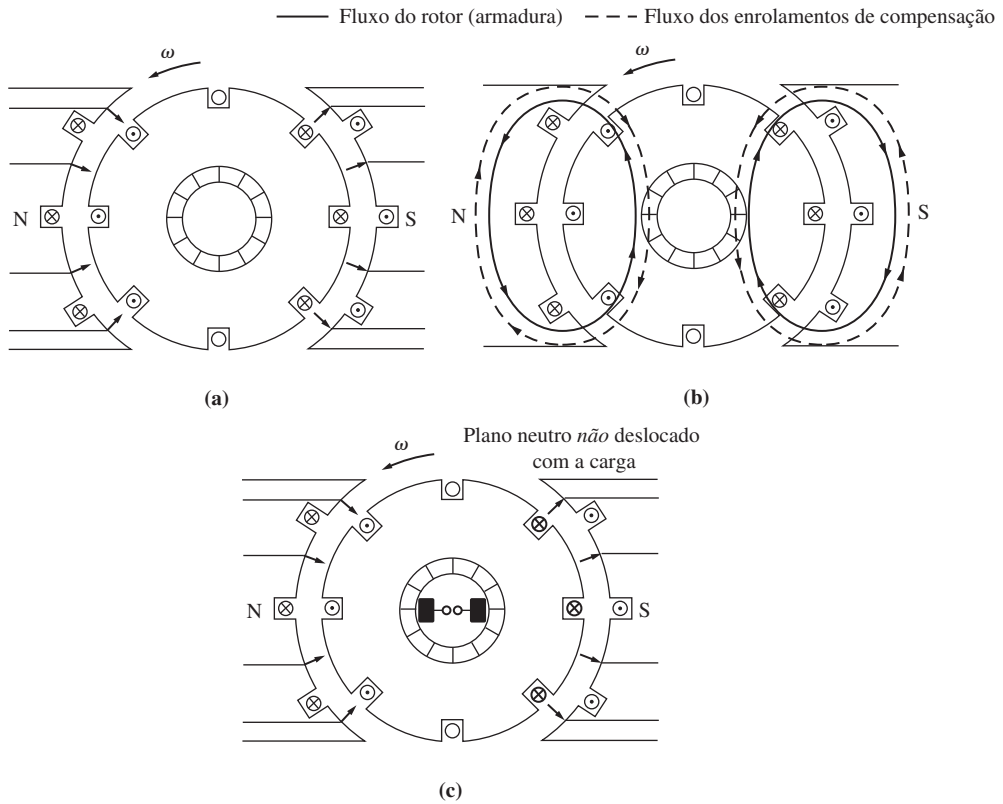


FIGURA 7-30

O efeito dos enrolamentos de compensação em uma máquina CC. (a) O fluxo nos polos da máquina; (b) os fluxos da armadura e dos enrolamentos de compensação. Observe que eles são iguais e opostos; (c) o fluxo líquido da máquina, que é simplesmente o fluxo original dos polos.

ENROLAMENTOS DE COMPENSAÇÃO. No caso dos motores com funcionamento muito carregado, o problema do enfraquecimento de fluxo pode ser muito sério. Para cancelar completamente a reação de armadura, eliminando assim simultaneamente o deslocamento do plano neutro e o enfraquecimento de fluxo, foi desenvolvida uma técnica diferente. Essa terceira abordagem envolve a colocação de *enrolamentos de compensação* em ranhuras abertas nas faces dos polos, paralelamente aos condutores do rotor, cancelando assim o efeito de distorção causado pela reação de armadura. Esses enrolamentos são conectados em série com os enrolamentos do rotor. Desse modo, sempre que houver mudança de carga no rotor, haverá também alteração de corrente nos enrolamentos de compensação. A Figura 7-30 mostra o conceito básico. Na Figura 7-30a, o fluxo nos polos é evidente por si mesmo. Na Figura 7-30b, são mostrados o fluxo do rotor e o fluxo nos enrolamentos de compensação. A Figura 7-30c representa a soma desses três fluxos, que é simplesmente igual ao fluxo original dos polos principais.

A Figura 7-31 mostra um desenvolvimento mais cuidadoso do efeito dos enrolamentos de compensação em uma máquina CC. Observe que a força magnetomotriz

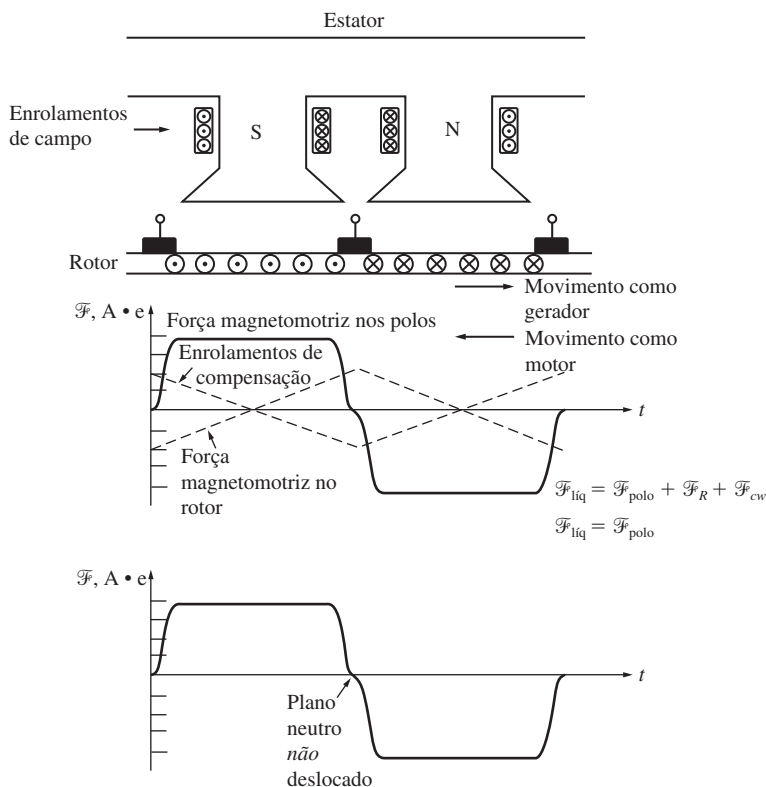


FIGURA 7-31 O fluxo e as forças magnetomotrizes em uma máquina CC com enrolamentos de compensação.

devido aos enrolamentos de compensação é igual e oposta à força magnetomotriz devido ao rotor em cada ponto debaixo das faces dos polos. A força magnetomotriz líquida resultante é exatamente a força magnetomotriz devido aos polos. Desse modo, o fluxo na máquina mantém-se inalterado, independentemente da carga submetida à máquina. O estator de uma máquina CC de grande porte com enrolamentos de compensação está mostrado na Figura 7-32.

A principal desvantagem dos enrolamentos de compensação é que eles são caros, porque devem ser construídos nas faces dos polos. Qualquer motor que os utilize também necessitará de interpolos, porque os enrolamentos de compensação não cancelam os efeitos $L di/dt$. Entretanto, os interpolos não precisam ser tão robustos, porque eles cancelam apenas as tensões $L di/dt$ nos enrolamentos, e não as tensões devido ao deslocamento do plano neutro. Devido ao elevado custo dos interpolos e dos enrolamentos de compensação em tal máquina, esses enrolamentos são usados somente nos casos em que isso é exigido, tendo em conta o caráter extremamente carregado que é exigido do funcionamento de um motor.

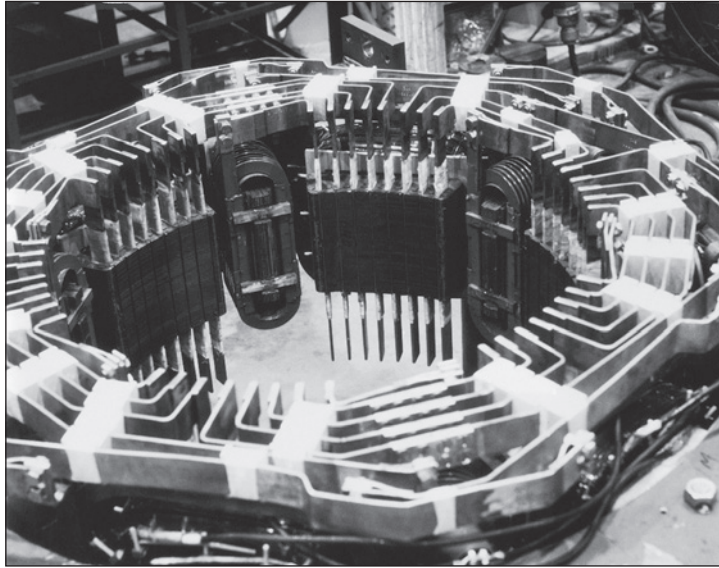


FIGURA 7-32
 O estator de uma máquina CC de seis polos com interpolos e enrolamentos de compensação.
 (Cortesia de Westinghouse Electric Company.)

7.5 A TENSÃO INTERNA GERADA E AS EQUAÇÕES DE CONJUGADO INDUZIDO PARA MÁQUINAS CC REAIS

Quanta tensão é produzida por uma máquina CC real? A tensão induzida em qualquer máquina dada depende de três fatores:

1. O fluxo ϕ da máquina
2. A velocidade ω_m do rotor da máquina
3. Uma constante que depende da construção da máquina

Como se pode determinar a tensão nos enrolamentos do rotor de uma máquina real? A tensão produzida na saída da armadura de uma máquina real é igual ao número de condutores por caminho de corrente vezes a tensão em cada condutor. Demonstrou-se anteriormente que a tensão em *um único condutor debaixo das faces polares* é

$$e_{\text{ind}} = e = vBl \tag{7-31}$$

A tensão na saída da armadura de uma máquina real é, então,

$$E_A = \frac{ZvBl}{a} \tag{7-32}$$

em que Z é o número total de condutores e a é o número de caminhos de corrente. A velocidade de cada condutor do rotor pode ser expressa como $v = r\omega_m$, em que r é o raio do rotor. Portanto, temos

$$E_A = \frac{Zr\omega_m B l}{a} \quad (7-33)$$

Essa tensão pode ser expressa em uma forma mais conveniente, observando que o fluxo de um polo é igual à densidade de fluxo debaixo do polo vezes a área do polo:

$$\phi = BA_p$$

O rotor da máquina tem a forma de um cilindro, de modo que sua área é

$$A = 2\pi r l \quad (7-34)$$

Se houver P polos na máquina, então a área associada com cada polo será a área total dividida pelo número de polos P :

$$A_p = \frac{A}{P} = \frac{2\pi r l}{P} \quad (7-35)$$

Assim, o *fluxo total por polo* da máquina é

$$\phi = BA_p = \frac{B(2\pi r l)}{P} = \frac{2\pi r l B}{P} \quad (7-36)$$

Portanto, a tensão interna gerada na máquina pode ser expressa como

$$\begin{aligned} E_A &= \frac{Zr\omega_m B l}{a} \quad (7-33) \\ &= \left(\frac{ZP}{2\pi a}\right) \left(\frac{2\pi r l B}{P}\right) \omega_m \end{aligned}$$

$$\boxed{E_A = \frac{ZP}{2\pi a} \phi \omega_m} \quad (7-37)$$

Finalmente,

$$\boxed{E_A = K\phi\omega_m} \quad (7-38)$$

em que

$$\boxed{K = \frac{ZP}{2\pi a}} \quad (7-39)$$

Na prática industrial moderna, é comum expressar a velocidade de uma máquina em rotações por minuto em vez de em radianos por segundo. A conversão de rotações por minuto para radianos por segundo é dada por

$$\omega_m = \frac{2\pi}{60} n_m \quad (7-40)$$

de modo que a equação da tensão, com a velocidade expressa em rotações por minuto, é

$$\boxed{E_A = K'\phi n_m} \quad (7-40)$$

em que

$$K' = \frac{ZP}{60a} \quad (7-42)$$

Quanto conjugado é induzido na armadura de uma máquina CC real? O conjugado em qualquer máquina CC depende de três fatores:

1. O fluxo ϕ da máquina
2. A corrente I_A de armadura (ou rotor) da máquina
3. Uma constante que depende das características construtivas da máquina

Como se pode determinar o conjugado no rotor de uma máquina real? O conjugado na armadura de uma máquina real é igual ao número de condutores Z vezes o conjugado em cada condutor. Demonstrou-se antes que o conjugado em *um único condutor debaixo das faces polares* é

$$\tau_{\text{cond}} = rI_{\text{cond}}B \quad (7-43)$$

Se houver a caminhos de corrente na máquina, então a corrente total de armadura I_A será dividida entre os a caminhos de corrente, de modo que a corrente em um único condutor é dada por

$$I_{\text{cond}} = \frac{I_A}{a} \quad (7-44)$$

e o conjugado sobre um único condutor do motor pode ser expresso como

$$\tau_{\text{cond}} = \frac{rI_A B}{a} \quad (7-45)$$

Como há Z condutores, o conjugado total induzido no rotor de uma máquina CC é

$$\tau_{\text{ind}} = \frac{ZrBI_A}{a} \quad (7-46)$$

Nessa máquina, o fluxo por polo pode ser expresso como

$$\phi = BA_p = \frac{B(2\pi rl)}{P} = \frac{2\pi rlB}{P} \quad (7-47)$$

de modo que o conjugado induzido também pode ser expresso como

$$\tau_{\text{ind}} = \frac{ZP}{2\pi a} \phi I_A \quad (7-48)$$

Finalmente,

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

em que

$$K = \frac{ZP}{2\pi a} \quad (7-39)$$

Essas equações recém apresentadas, expressando a tensão interna gerada e o conjugado induzido, são apenas aproximações, porque nem todos os condutores de uma máquina estão debaixo das faces polares em um instante qualquer e também porque a superfície de cada polo não cobre por inteiro uma fração $1/P$ da superfície do rotor. Para obter maior exatidão, o número de condutores debaixo das faces dos polos poderia ser usado no lugar do número total de condutores do rotor.

EXEMPLO 7-3 Uma armadura duplex com enrolamento imbricado é usada em uma máquina CC de seis polos com seis conjuntos de escovas, cada uma abrangendo dois segmentos de comutador. Há 72 bobinas na armadura, cada uma com 12 espiras. O fluxo por polo da máquina é 0,039 Wb e ela está girando a 400 rpm.

- (a) Quantos caminhos de corrente há nessa máquina?
 (b) Qual é a tensão induzida E_A ?

Solução

- (a) O número de caminhos de corrente nessa máquina é

$$a = mP = 2(6) = 12 \text{ caminhos de corrente} \quad (7-26)$$

- (b) A tensão induzida na máquina é

$$E_A = K' \phi n_m \quad (7-41)$$

e

$$K' = \frac{ZP}{60a} \quad (7-42)$$

O número de condutores na máquina é

$$\begin{aligned} Z &= 2CN_C \\ &= 2(72)(12) = 1728 \text{ condutores} \end{aligned} \quad (7-22)$$

Portanto, a constante K' é

$$K' = \frac{ZP}{60a} = \frac{(1728)(6)}{(60)(12)} = 14,4$$

e a tensão E_A é

$$\begin{aligned} E_A &= K' \phi n_m \\ &= (14,4)(0,039 \text{ Wb})(400 \text{ rpm}) \\ &= 224,6 \text{ V} \end{aligned}$$

EXEMPLO 7-4 Um gerador CC de 12 polos tem uma armadura simplex com enrolamento ondulado contendo 144 bobinas de 10 espiras cada. A resistência de cada espira é 0,011 Ω . Seu fluxo por polo é 0,05 Wb e ele está girando com uma velocidade de 200 rpm.

- (a) Quantos caminhos de corrente há nessa máquina?
 (b) Qual é a tensão de armadura induzida dessa máquina?
 (c) Qual é a resistência de armadura efetiva dessa máquina?

- (d) Se um resistor de 1 kΩ for ligado aos terminais desse gerador, qual será o contraconjugado induzido resultante sobre o eixo da máquina? (Ignore a resistência de armadura interna da máquina).

Solução

(a) Há $a = 2m = 2$ caminhos de corrente nesse enrolamento.

(b) Há $Z = 2CN_c = 2(144)(10) = 2880$ condutores no rotor do gerador. Assim,

$$K' = \frac{ZP}{60a} = \frac{(2880)(12)}{(60)(2)} = 288$$

Portanto, a tensão induzida é

$$\begin{aligned} E_A &= K' \phi n_m \\ &= (288)(0,05 \text{ Wb})(200 \text{ rpm}) \\ &= 2880 \text{ V} \end{aligned}$$

(c) Há dois caminhos paralelos atravessando o rotor dessa máquina, cada um consistindo em $Z/2 = 1440$ condutores, ou 720 espiras. Portanto, a resistência de cada caminho de corrente é

$$\text{Resistência/caminho} = (720 \text{ espiras})(0,011 \text{ } \Omega/\text{espira}) = 7,92 \text{ } \Omega$$

Como há dois caminhos paralelos, a resistência de armadura efetiva é

$$R_A = \frac{7,92 \text{ } \Omega}{2} = 3,96 \text{ } \Omega$$

(d) Se uma carga de 1000 Ω for ligada aos terminais do gerador e se R_A for ignorada, então circulará uma corrente de $I = 2880 \text{ V}/1000 \text{ } \Omega = 2,88 \text{ A}$. A constante K é dada por

$$K = \frac{ZP}{2\pi a} = \frac{(2880)(12)}{(2\pi)(2)} = 2750,2$$

Portanto, o contraconjugado no eixo do gerador é

$$\begin{aligned} \tau_{\text{ind}} &= K \phi I_A = (2750,2)(0,05 \text{ Wb})(2,88 \text{ A}) \\ &= 396 \text{ N} \cdot \text{m} \end{aligned}$$

7.6 A CONSTRUÇÃO DE MÁQUINAS CC

Um esquema simplificado de uma máquina CC está mostrado na Figura 7-33 e um diagrama mais detalhado em corte está mostrado na Figura 7-34.

A estrutura física da máquina consiste em duas partes: o *estator* ou parte estacionária e o *rotor* ou parte rotativa. A parte estacionária da máquina é constituída de uma *carcaça* que fornece o suporte físico e de *peças polares* que se projetam para dentro e propiciam um caminho para o fluxo magnético na máquina. As extremidades das peças polares, que estão mais próximas do rotor, alargam-se sobre a superfície do rotor para distribuir uniformemente o seu fluxo sobre a superfície do rotor. Essas extremidades são denominadas *sapatas polares*. A superfície exposta de uma sapata polar é denominada *face polar* e a distância entre as faces polares e o rotor é denominada *entreferro de ar*, ou simplesmente *entreferro*.

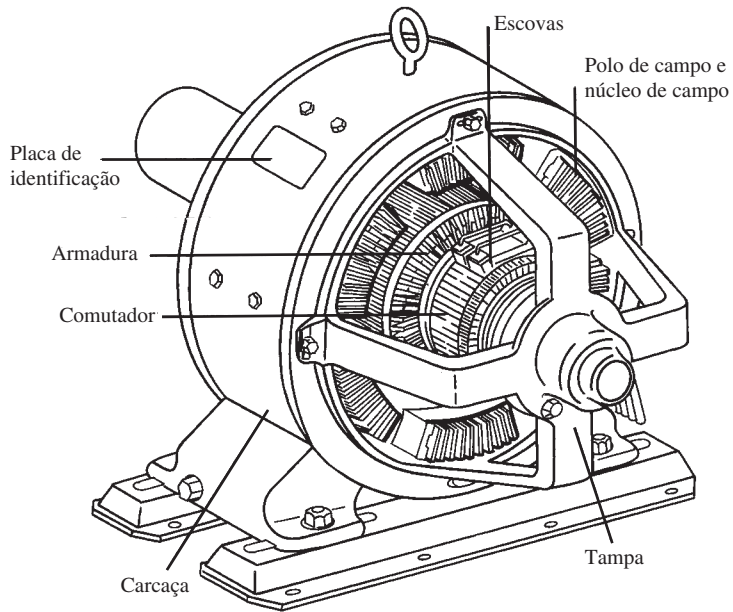


FIGURA 7-33
Diagrama simplificado de uma máquina CC.

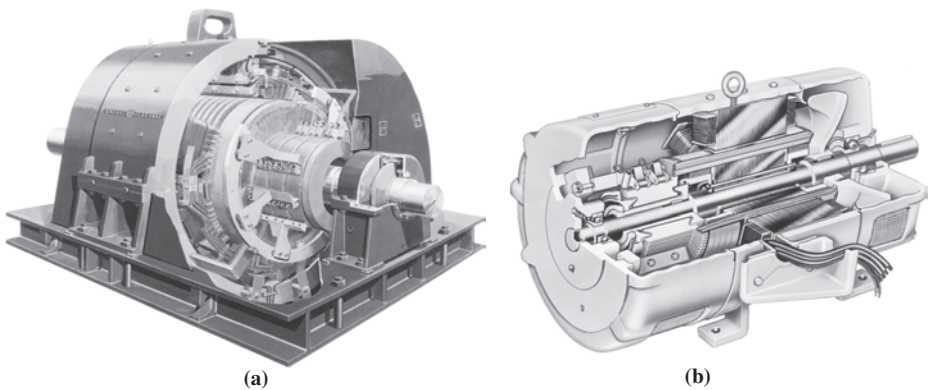


FIGURA 7-34
(a) Vista em corte de uma máquina CC de 4000 HP, 700 V e 18 polos, mostrando os enrolamentos de compensação, os interpolos, os equalizadores e o comutador. (Cortesia de General Electric Company.) (b) Vista em corte de um motor CC de porte menor com quatro polos, incluindo os interpolos, mas sem os enrolamentos de compensação. (Cortesia de MagneTek, Inc.)

Há dois enrolamentos principais em uma máquina CC: os enrolamentos de armadura e os enrolamentos de campo. Os *enrolamentos de armadura* são definidos como os enrolamentos nos quais a tensão é induzida e os *enrolamentos de campo* são definidos como os enrolamentos que produzem o fluxo magnético principal da máquina. Em uma máquina CC normal, os enrolamentos de armadura estão localizados no rotor e os enrolamentos de campo estão localizados no estator. Como os enrolamentos de armadura estão localizados no rotor, o próprio rotor de uma máquina CC é denominado algumas vezes *armadura*.

Algumas características construtivas importantes de um motor CC típico serão descritas a seguir.

Construção dos polos e da carcaça

Frequentemente, os polos principais das máquinas CC antigas eram feitas de uma peça única fundida em metal, com os enrolamentos de campo colocados a seu redor. Geralmente tinham bordas laminadas aparafusadas para reduzir as perdas do núcleo nas faces polares. Desde que as unidades de acionamento de estado sólido tornaram-se comuns, os polos principais das máquinas mais modernas são feitos inteiramente de material laminado (veja a Figura 7-35). Isso é verdadeiro porque há um conteúdo CA muito mais elevado na potência elétrica que os acionamentos de estado sólido fornecem aos motores CC, resultando em perdas muito maiores por correntes parasitas nos estatores das máquinas. Tipicamente, as faces polares são de construção *chanfrada* ou *excêntrica*, o que significa que as bordas mais distanciadas da face polar estão um pouco mais afastadas da superfície do rotor do que a parte central da face polar (veja a Figura 7-36). Esse detalhe aumenta a relutância nas bordas da face polar, reduzindo o efeito de concentração de fluxo causado pela reação de armadura da máquina.

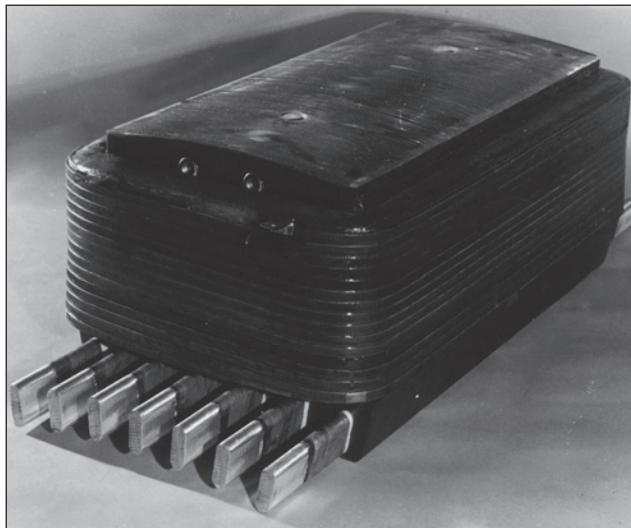


FIGURA 7-35

Unidade de polo de campo principal para um motor CC. Observe as laminações do polo e os enrolamentos de compensação. (Cortesia de General Electric Company.)

Os polos das máquinas CC são denominados *polos salientes*, porque eles se erguem a partir da superfície do estator.

Os interpolos nas máquinas CC estão localizados entre os polos principais e, cada vez mais, eles apresentam construção em lâminas, devido aos mesmos problemas de perdas que ocorrem nos polos principais.

Alguns fabricantes estão mesmo usando lâminas na construção da parte da carcaça (*yoke*) que serve de caminho de retorno para o fluxo magnético, com o propósito de reduzir ainda mais as perdas no núcleo, que ocorrem nos motores acionados eletronicamente.

Construção do rotor ou armadura

O rotor ou armadura de uma máquina CC consiste em um eixo usinado a partir de uma barra de aço com um núcleo construído por cima dele. O núcleo é composto de muitas lâminas estampadas a partir de uma chapa de aço, tendo ranhuras na sua superfície externa para alojar os enrolamentos de armadura. O comutador é construído sobre o eixo do rotor em uma das extremidades do núcleo. As bobinas da armadura são depositadas nas ranhuras do núcleo, como foi descrito na Seção 7.4, e seus lados são conectadas aos segmentos do comutador. O rotor de uma máquina CC de grande porte está mostrado na Figura 7-37.

Comutadores e escovas

Tipicamente, o comutador de uma máquina CC (Figura 7-38) é feito de barras de cobre isoladas com material à base de mica. As barras de cobre são feitas suficientemente espessas para permitir o desgaste natural durante toda a vida útil do motor. O isolamento de mica entre os segmentos do comutador é mais duro que o material do próprio comutador. Desse modo, depois de muito tempo de uso de uma máquina, frequentemente é necessário *aparar* a isolação do comutador, para assegurar que ela não fique saliente por cima das barras de cobre.

As escovas da máquina são feitas de carbono, grafite, ligas de metal e grafite ou de uma mistura de grafite e metal. Elas apresentam elevada condutividade para reduzir as perdas elétricas e o baixo coeficiente de atrito para reduzir o desgaste excessivo. Elas são feitas deliberadamente de um material bem mais macio que os segmentos do

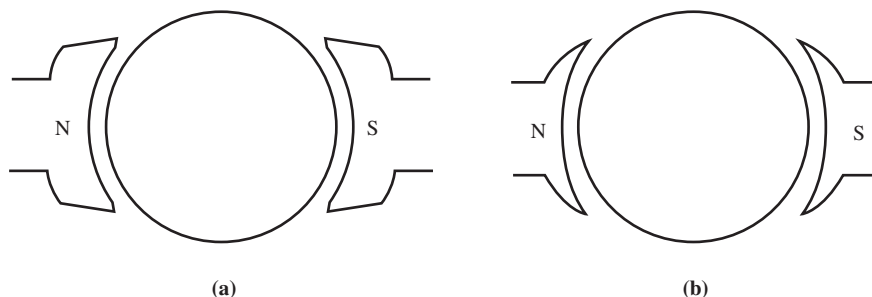


FIGURA 7-36

Polos com largura extra de entreferro nas bordas para reduzir a reação de armadura. (a) Polos chanfrados; (b) polos excêntricos ou de espessura gradativamente variada.

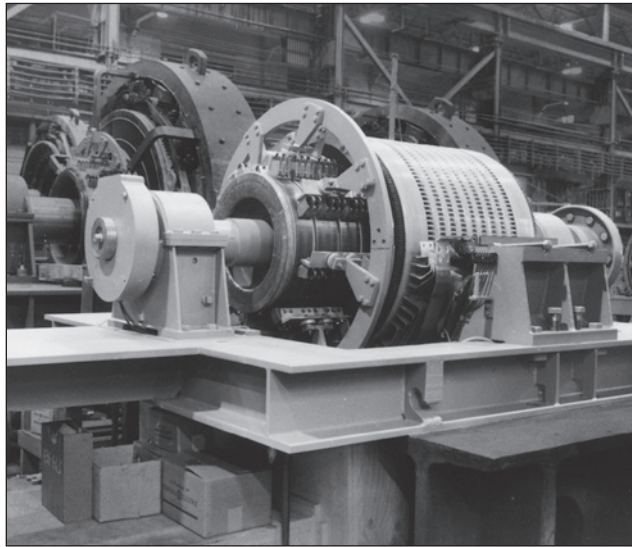


FIGURA 7-37

Fotografia de uma máquina CC, com a metade superior do estator removida, mostrando a construção do seu rotor. (Cortesia de General Electric Company.)

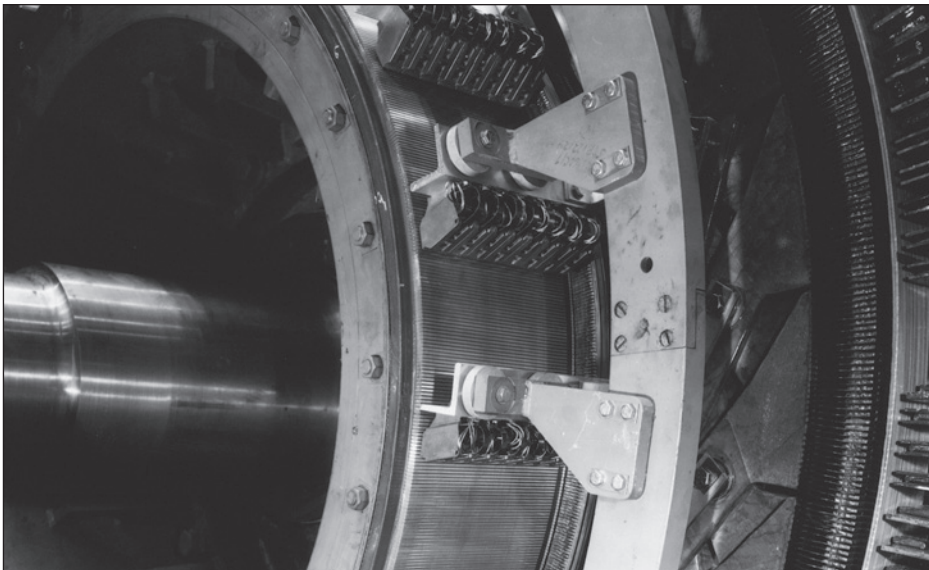


FIGURA 7-38

Vista em detalhe do comutador e das escovas de uma máquina CC de grande porte. (Cortesia de General Electric Company.)

comutador, para que a superfície do comutador sofra muito pouco desgaste. A escolha da dureza das escovas é um meio-termo: se as escovas forem macias demais, elas deverão ser substituídas frequentemente, mas, se forem muito duras, a superfície do comutador sofrerá demasiado desgaste durante a vida útil da máquina.

Todo o desgaste que ocorre na superfície do comutador é resultado direto do fato de que as escovas devem friccionar essa superfície para converter a tensão CA dos condutores do rotor em tensão CC nos terminais da máquina. Se a pressão das escovas for demasiada, ambas, as escovas e as barras do comutador, irão se desgastar excessivamente. Entretanto, se a pressão for baixa demais, as escovas tenderão a saltar levemente e uma grande quantidade de faiscamento ocorrerá na interface entre as escovas e os segmentos do comutador. Esse faiscamento é igualmente prejudicial para as escovas e a superfície do comutador. Portanto, a pressão das escovas sobre a superfície do comutador deve ser ajustada cuidadosamente para uma vida máxima.

Outro fator que afeta o desgaste das escovas e dos segmentos no comutador de uma máquina CC é a quantidade de corrente que circula na máquina. Normalmente, as escovas deslizam sobre a superfície do comutador em uma fina camada de óxido, que lubrifica o movimento da escovas sobre os segmentos. Entretanto, se a corrente for muito pequena, essa camada rompe-se e o atrito entre as escovas e o comutador é grandemente aumentado. Esse atrito aumentado contribui a um desgaste rápido. Para obter um máximo de vida das escovas, uma máquina deveria estar sempre parcialmente carregada.

Isolamento dos enrolamentos

Além do comutador, a parte mais crítica da estrutura de um motor CC é o isolamento de seus enrolamentos. Se houver a ruptura desse isolamento, então o motor entrará em curto-circuito. O conserto de uma máquina com o isolamento em curto é muito dispendioso, se é que é possível o conserto. Para evitar que o isolamento dos enrolamentos da máquina sofra ruptura como resultado do sobreaquecimento, torna-se necessário limitar a temperatura dos enrolamentos. Isso pode ser feito em parte providenciando para que ar refrigerado circule entre eles. Por outro lado, a temperatura máxima dos enrolamentos limita a potência máxima que pode ser fornecida continuamente pela máquina.

O isolamento raramente falha devido a uma ruptura imediata em alguma temperatura crítica. Em vez disso, o aumento de temperatura produz uma degradação sistemática do isolamento, tornando-o sujeito a falhas em razão de alguma outra causa como choque, vibração ou estresse elétrico. Há uma antiga regra prática que afirma que um motor com um certo isolamento tem sua expectativa de vida reduzida à metade a cada vez que a temperatura dos enrolamentos aumenta em 10%. Até certo grau, essa regra ainda pode ser aplicada atualmente.

Para padronizar os limites de temperatura do isolamento das máquinas, a National Electrical Manufacturers Association (NEMA), nos Estados Unidos, definiu uma série de *classes de sistemas de isolamento*. Cada classe especifica o aumento máximo permitido de temperatura para um dado tipo de isolamento. Para motores CC de potência elevada, há quatro classes padronizadas NEMA de isolamento: A, B, F e H. Cada classe dessa sequência representa uma temperatura permitida para o enrolamento que é mais elevada do que a da classe anterior. Por exemplo, para um dado tipo de motor CC de funcionamento contínuo, se a elevação da temperatura do enrolamento

de armadura, acima da temperatura ambiente, for medida com um termômetro, então ela deverá estar limitada a 70°C no isolamento da classe A, a 100°C na classe B, a 130°C na classe F e a 150°C na classe H.

Essas especificações de temperatura estão descritas detalhadamente na Norma MG1-1993 da NEMA, *Motors and Generators*. Normas semelhantes foram definidas pela International Electrotechnical Commission (IEC) e por várias organizações nacionais de normalização em outros países.*

7.7 FLUXO DE POTÊNCIA E PERDAS NAS MÁQUINAS CC

Os geradores CC recebem potência mecânica e produzem potência elétrica, ao passo que os motores CC recebem potência elétrica e produzem potência mecânica. Em ambos os casos, nem toda a potência que entra na máquina aparece de forma útil no outro lado – *sempre* há alguma perda associada ao processo.

A eficiência de uma máquina CC é definida pela equação

$$\eta = \frac{P_{saída}}{P_{entrada}} \times 100\% \quad (7-50)$$

A diferença entre a potência de entrada e a potência de saída da máquina corresponde às perdas que ocorrem em seu interior. Portanto,

$$\eta = \frac{P_{saída} - P_{perdas}}{P_{entrada}} \times 100\% \quad (7-51)$$

As perdas em máquinas CC

As perdas que ocorrem nas máquinas CC podem ser divididas em cinco categorias básicas:

1. Perdas elétricas ou no cobre (perdas I^2R)
2. Perdas nas escovas
3. Perdas no núcleo
4. Perdas mecânicas
5. Perdas suplementares

PERDAS ELÉTRICAS OU NO COBRE. As perdas no cobre são as que ocorrem nos enrolamentos da armadura e do campo da máquina. As perdas no cobre dos enrolamentos da armadura e do campo são dadas pela equação

$$\text{Perdas na armadura: } P_A = I_A^2 R_A \quad (7-52)$$

$$\text{Perdas no campo: } P_F = I_F^2 R_F \quad (7-53)$$

* N. de T.: No Brasil, essa regulamentação é feita pela ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas).

em que P_A = perdas na armadura
 P_F = perdas no campo
 I_A = corrente de armadura
 I_F = corrente de campo
 R_A = resistência de armadura
 R_F = resistência de campo

A resistência usada nesses cálculos é usualmente a resistência do enrolamento na temperatura normal de funcionamento.

PERDAS NAS ESCOVAS. A perda associada à queda de tensão nas escovas (QE) é a potência perdida através do potencial de contato das escovas da máquina. Essas perdas são dadas pela equação

$$P_{QE} = V_{QE} I_A \quad (7-54)$$

em que P_{QE} = perdas devido à queda de tensão nas escovas
 V_{QE} = queda de tensão nas escovas
 I_A = corrente de armadura

A razão pela qual as perdas nas escovas são calculadas desse modo é que a queda de tensão em um conjunto de escovas é aproximadamente constante dentro de um amplo intervalo de correntes de armadura. A não ser que seja especificado em contrário, assume-se usualmente que a queda de tensão nas escovas é em torno de 2 V.

PERDAS NO NÚCLEO. As perdas no núcleo são as perdas por histerese e por corrente parasita, que ocorrem no metal do motor. Essas perdas foram descritas no Capítulo 1. Elas variam com o quadrado da densidade de fluxo (B^2) e, para o rotor, com a potência 1,5 da velocidade de rotação ($n^{1.5}$).

PERDAS MECÂNICAS. As perdas mecânicas em uma máquina CC são as que estão associadas aos efeitos mecânicos. Há dois tipos básicos de perdas mecânicas: *atrimento* e *ventilação*. Perdas por atrimento são causadas pelo atrimento dos rolamentos da máquina, ao passo que as perdas por ventilação são causadas pelo atrimento entre as partes móveis da máquina e o ar contido dentro do motor. Essas perdas variam com o cubo da velocidade de rotação da máquina.

PERDAS SUPLEMENTARES (OU VARIADAS). Perdas suplementares são aquelas que não podem ser colocadas em nenhuma das categorias anteriores. Independentemente de quão cuidadosa é a análise das perdas, algumas delas acabam não sendo incluídas em nenhuma categoria. Todas essas perdas reunidas constituem o que se denomina perdas suplementares. Para a maioria das máquinas, as perdas suplementares são consideradas por convenção como representando 1% da carga total.

O diagrama de fluxo de potência

Uma das técnicas mais convenientes para contabilizar as perdas de potência em uma máquina é o *diagrama de fluxo de potência*. O diagrama de fluxo de potência de um gerador CC está mostrado na Figura 7-39a. Nessa figura, a potência mecânica entra

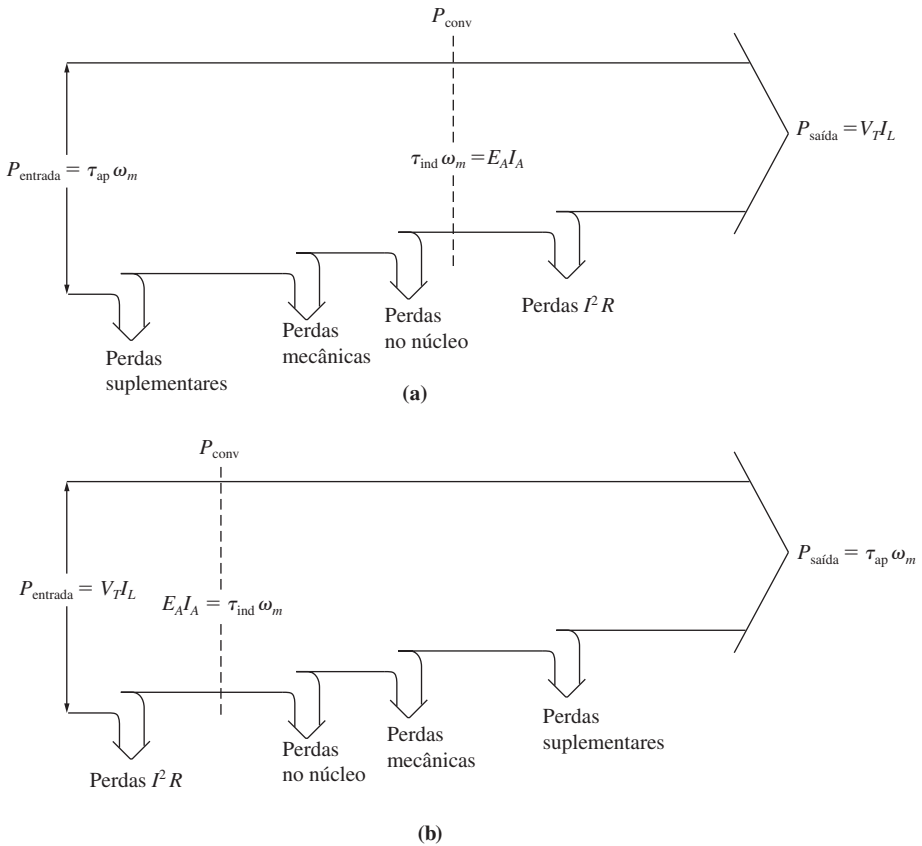


FIGURA 7-39 Diagramas de fluxo de potência de máquina CC. (a) Gerador ; (b) motor.

na máquina e, então, são subtraídas as perdas suplementares, as mecânicas e as no núcleo. Depois da subtração, a potência restante é convertida idealmente da forma mecânica para a elétrica no ponto denominado P_{conv} . A potência mecânica convertida é dada por

$$P_{conv} = \tau_{ind} \omega_m \tag{7-55}$$

e a potência elétrica resultante é dada por

$$P_{conv} = E_A I_A \tag{7-56}$$

Entretanto, essa não é a potência que aparece nos terminais da máquina. Antes de chegar aos terminais, as perdas elétricas $I^2 R$ e as perdas nas escovas devem ser subtraídas.

No caso de motores CC, esse diagrama de fluxo de potência é simplesmente invertido. O diagrama de fluxo de potência de um motor está mostrado na Figura 7-39b.

Exemplos de problemas envolvendo o cálculo da eficiência de motores e geradores serão dados nos Capítulos 8 e 9.

7.8 SÍNTESE DO CAPÍTULO

As máquinas CC convertem potência mecânica em potência elétrica CC e vice-versa. Neste capítulo, os princípios básicos do funcionamento de uma máquina CC foram explicados, primeiro, examinando uma máquina linear simples e, a seguir, analisando uma máquina que consiste em uma única espira girante.

O conceito de comutação como técnica para converter a tensão CA dos condutores do rotor em uma saída CC foi apresentado e seus problemas foram explorados. As configurações possíveis de enrolamentos de condutores de um rotor CC (enrolamentos imbricado e ondulado) também foram examinadas.

A seguir, foram desenvolvidas equações para a tensão e o conjugado induzidos em uma máquina CC e foi descrita a construção física das máquinas. Finalmente, os tipos de perdas da máquina CC foram descritos e relacionados com a sua eficiência total.

PERGUNTAS

- 7.1 O que é comutação? Como um comutador pode converter as tensões CA da armadura de uma máquina em tensões CC nos seus terminais?
- 7.2 Por que o encurvamento das faces dos polos de uma máquina CC contribui para uma tensão CC mais suave em sua saída?
- 7.3 O que é o fator de passo de uma bobina?
- 7.4 Explique o conceito de graus elétricos. Como o ângulo elétrico da tensão de um condutor de rotor está relacionado com o ângulo mecânico do eixo da máquina?
- 7.5 O que é o passo do comutador?
- 7.6 O que é a multiplicidade de um enrolamento de armadura?
- 7.7 Qual é a diferença entre os enrolamentos imbricado e ondulado?
- 7.8 O que são equalizadores? Por que eles são necessários em uma máquina de enrolamento imbricado, mas não em uma máquina de enrolamento ondulado?
- 7.9 O que é a reação de armadura? Como afeta o funcionamento de uma máquina CC?
- 7.10 Explique o problema da tensão $L di/dt$ nos condutores que são submetidos à comutação.
- 7.11 Como o deslocamento das escovas afeta o problema do faiscamento nas máquinas CC?
- 7.12 O que são os polos de comutação ou interpolos? Como eles são usados?
- 7.13 O que são enrolamentos de compensação? Qual é sua maior desvantagem?
- 7.14 O que são polos laminados usados na construção de máquinas CC modernas?
- 7.15 O que é uma classe de isolamento?
- 7.16 Que tipos de perdas estão presentes em uma máquina CC?

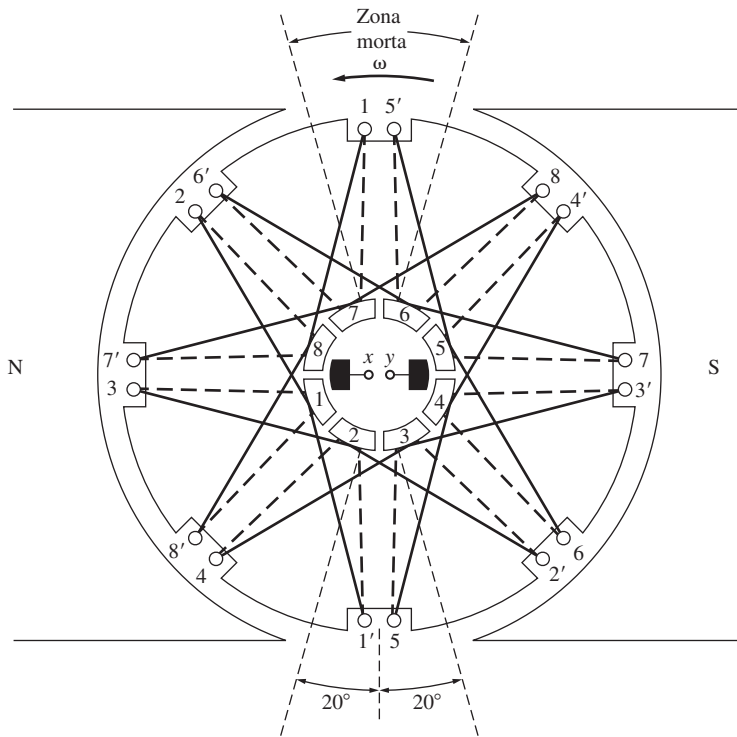
PROBLEMAS

7.1 A seguinte informação é dada a respeito da espira rotativa simples da Figura 7-6:

$$\begin{aligned}
 B &= 0,4 \text{ T} & V_B &= 48 \text{ V} \\
 l &= 0,5 \text{ m} & R &= 0,4 \Omega \\
 r &= 0,25 \text{ m} & \omega &= 500 \text{ rad/s}
 \end{aligned}$$

- (a) Essa máquina está operando como motor ou gerador? Explique.
- (b) Qual é o valor da corrente i que está entrando ou saindo da máquina? Qual é a potência que está entrando ou saindo da máquina?
- (c) Se a velocidade do rotor fosse alterada para 550 rad/s, que aconteceria à corrente que está entrando ou saindo da máquina?
- (d) Se a velocidade do rotor fosse alterada para 450 rad/s, que aconteceria à corrente que está entrando ou saindo da máquina?

7.2 Consulte a máquina simples de dois polos e oito bobinas mostrada na Figura P7-1. A seguinte informação é dada a respeito dessa máquina:



Dados: $B = 1,0 \text{ T}$ no entreferro
 $l = 0,3 \text{ m}$ (comprimento dos lados)
 $r = 0,10 \text{ m}$ (raio das bobinas)
 $n = 1800 \text{ rpm}$

———— Linhas neste lado do rotor
 - - - - Linhas no outro lado do rotor

FIGURA P7-1
 A máquina do Problema 7-2.

$$\begin{aligned}
 B &= 1,0 \text{ T} && \text{no entreferro} \\
 l &= 0,3 \text{ m} && \text{(comprimento dos lados das bobinas)} \\
 r &= 0,10 \text{ m} && \text{(raio das bobinas)} \\
 n &= 1800 \text{ rpm} && \text{anti-horário}
 \end{aligned}$$

A resistência de cada bobina do rotor é $0,04 \Omega$.

- O enrolamento de armadura mostrado é progressivo ou regressivo?
- Quantos caminhos de corrente passam através da armadura dessa máquina?
- Qual é o valor e a polaridade da tensão nas escovas da máquina?
- Qual é a resistência de armadura R_A dessa máquina?
- Se um resistor de 5Ω for conectado aos terminais da máquina, quanta corrente circulará nela? Leve em consideração a resistência interna da máquina ao determinar o fluxo de corrente.
- Quais são o valor e o sentido do conjugado induzido resultante?
- Assumindo que a velocidade de rotação e a densidade de fluxo magnético são constantes, plote a tensão de terminal dessa máquina em função da corrente que está saindo da máquina.

7.3 Prove que a equação da tensão induzida em uma única espira girante

$$e_{\text{ind}} = \frac{2}{\pi} \phi \omega_m \quad (7-6)$$

é apenas um caso especial da equação geral da tensão induzida de uma máquina CC

$$E_A = K \phi \omega_m \quad (7-38)$$

- 7.4** Uma máquina CC tem oito polos e uma corrente nominal de 120 A. Quanta corrente circulará em cada caminho nas condições nominais se a armadura tiver (a) enrolamento imbricado simplex, (b) enrolamento imbricado duplex e (c) enrolamento ondulado simplex?
- 7.5** Quantos caminhos paralelos de corrente haverá na armadura de uma máquina de 20 polos se a armadura tiver (a) enrolamento imbricado simplex, (b) enrolamento ondulado duplex, (c) enrolamento imbricado triplex, (d) enrolamento ondulado quadriplex?
- 7.6** A potência convertida de uma forma para outra dentro de um motor CC foi dada como

$$P_{\text{conv}} = E_A I_A = \tau_{\text{ind}} \omega_m$$

Use as equações para E_A e τ_{ind} [Equações (7-38) e (7-49)] para provar que $E_A I_A = \tau_{\text{ind}} \omega_m$, isto é, demonstre que a potência elétrica que desaparece no ponto da conversão de potência é exatamente igual à potência mecânica que surge nesse ponto.

- 7.7** Um gerador CC de oito polos, 25 kW e 120 V, tem uma armadura de enrolamento imbricado duplex, contendo 64 bobinas de 10 espiras cada uma. Sua velocidade nominal é 3600 rpm.
- Quanto fluxo por polo é necessário para produzir a tensão nominal nesse gerador em condições sem carga, a vazio?
 - Qual é a corrente por caminho na armadura do gerador em condições de carga nominal?
 - Qual é o conjugado induzido nessa máquina em condições de carga nominal?
 - Quantas escovas deve ter essa máquina? Qual deve ser a largura (em número de segmentos de comutador) de cada uma?
 - Se a resistência do enrolamento for $0,011 \Omega$ por espira, qual será a resistência de armadura R_A da máquina?

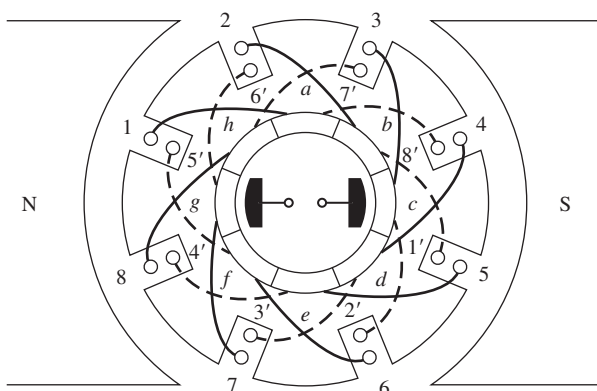
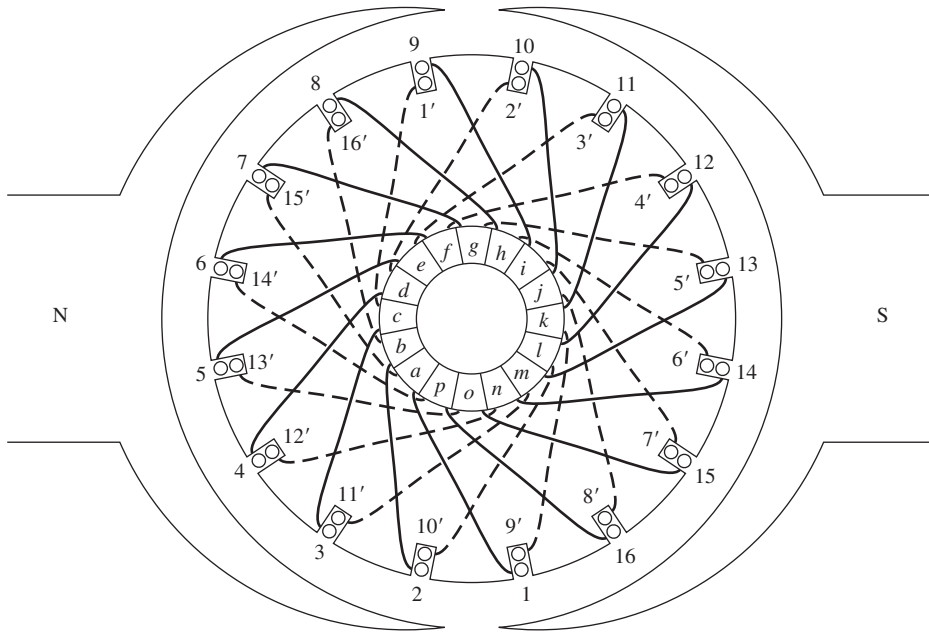


FIGURA P7-2
A máquina do Problema 7-8.

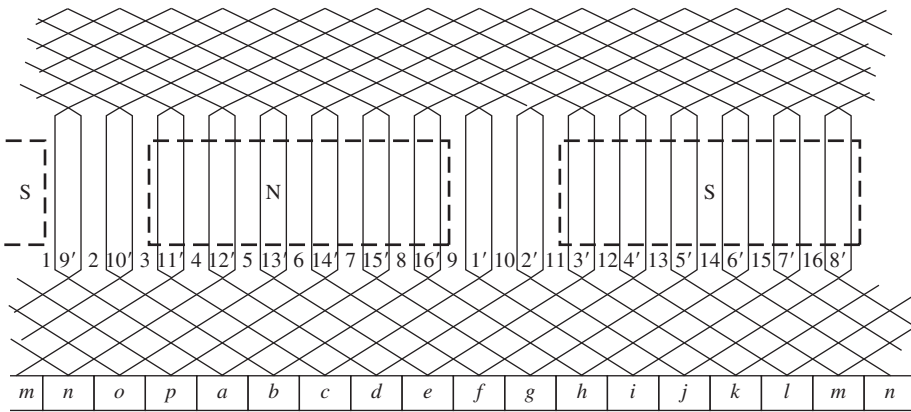
- 7.8** A Figura P7-2 mostra um pequeno motor CC de dois polos com oito bobinas no rotor e 10 espiras por bobina. O fluxo por polo dessa máquina é 0,006 Wb.
- Se esse motor for ligado a uma bateria de 12 V CC de um automóvel, qual será a velocidade do motor a vazio?
 - Se o terminal positivo da bateria for ligado à escova mais à direita do motor, em que sentido ele irá girar?
 - Se o motor receber uma carga tal que consuma 600 W da bateria, qual será o conjugado induzido do motor? (Ignore a resistência interna do motor.)
- 7.9** Consulte o enrolamento da máquina mostrada na Figura P7-3.
- Quantos caminhos paralelos de corrente há passando através do enrolamento da armadura?
 - Onde as escovas devem estar localizadas nessa máquina, para que ocorra uma comutação apropriada?
 - Qual é a multiplicidade do enrolamento dessa máquina?
 - Se a tensão em qualquer condutor, que esteja debaixo das faces polares dessa máquina, for e , qual será a tensão nos terminais da máquina?
- 7.10** Descreva em detalhes o enrolamento da máquina mostrada na Figura P7-4. Se uma tensão positiva for aplicada à escova debaixo da face do polo norte, o motor irá girar em que sentido?

REFERÊNCIAS

- Del Toro, V.: *Electric Machines and Power Systems*, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, N.J., 1985.
- Fitzgerald, A. E., C. Kingsley, Jr. e S. D. Umans: *Electric Machinery*, 6ª ed., McGraw-Hill, Nova York, 2003.
- Hubert, Charles I.: *Preventative Maintenance of Electrical Equipment*, 2ª ed., McGraw-Hill, Nova York, 1969.
- Kosow, Irving L.: *Electric Machinery and Transformers*, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, N.J., 1972.
- National Electrical Manufacturers Association: *Motors and Generators*, Publicação MG1-2006, NEMA, Washington, D.C., 2006.
- Siskind, Charles: *Direct Current Machinery*, McGraw-Hill, Nova York, 1952.
- Werninck, E. H. (ed.): *Electric Motor Handbook*, McGraw-Hill, London, 1978.



(a)



(b)

FIGURA P7-3

(a) A máquina do Problema 7-9. (b) Diagrama do enrolamento de armadura desta máquina.

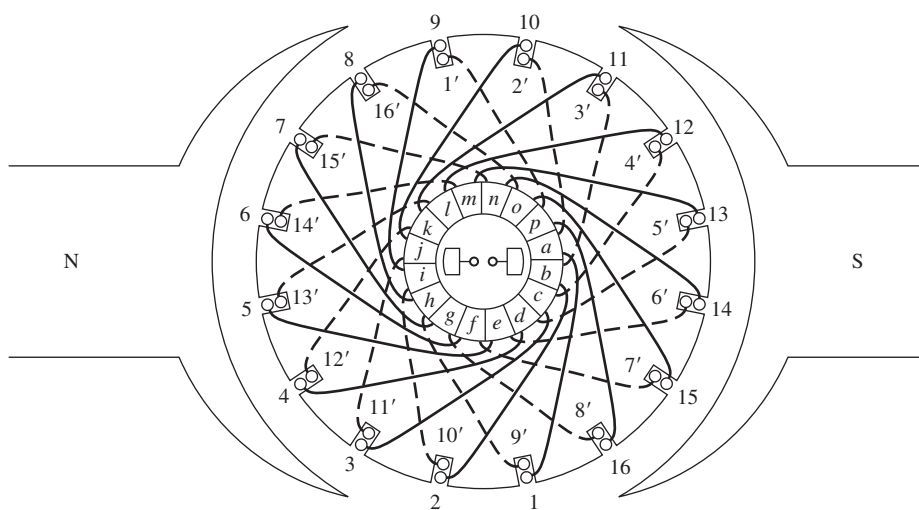


FIGURA P7-4
A máquina do Problema 7-10.