
capítulo

8

Motores e geradores CC

OBJETIVOS DE APRENDIZAGEM

- Conhecer os tipos de motores CC de uso geral.
 - Compreender o circuito equivalente de um motor CC.
 - Compreender como obter a característica de conjugado *versus* velocidade dos motores CC de excitação independente, em derivação, série e composta.
 - Ser capaz de realizar a análise não linear dos motores CC usando a curva de magnetização e levando em consideração os efeitos da reação de armadura.
 - Compreender como controlar a velocidade dos diferentes tipos de motores CC.
 - Compreender a característica especial dos motores CC série e as aplicações para as quais eles são especialmente adequados.
 - Ser capaz de explicar os problemas associados com o motor CC composto diferencial.
 - Compreender os métodos de partida segura dos motores CC.
 - Compreender o circuito equivalente de um gerador CC.
 - Compreender como é possível dar partida a um gerador CC sem usar uma fonte de tensão externa.
 - Compreender como obter a característica de tensão *versus* corrente dos geradores CC de excitação independente, em derivação, série e composta.
 - Ser capaz de realizar a análise não linear dos geradores CC usando a curva de magnetização e levando em consideração os efeitos da reação de armadura.
-

Os motores CC são máquinas CC usadas como motores, e os geradores CC são máquinas CC usadas como geradores. Como foi observado no Capítulo 7, a mesma máquina física pode operar como motor ou como gerador – é simplesmente uma questão relacionada com que sentido o fluxo de potência circula através da máquina. Este capítulo examinará os diferentes tipos de motores CC que podem ser construídos e

explicará as vantagens e desvantagens de cada um. Incluirá uma discussão da partida dos motores CC e dos controles de estado sólido. Finalmente, o capítulo concluirá com uma discussão dos geradores CC.

8.1 INTRODUÇÃO AOS MOTORES CC

Os primeiros sistemas de potência elétrica dos Estados Unidos eram de corrente contínua (veja a Figura 8-1), mas, na década de 1890, os sistemas de potência de corrente alternada estavam claramente ultrapassando os de corrente contínua. Apesar desse fato, os motores CC continuaram sendo uma fração significativa das máquinas elétricas compradas a cada ano até a década de 1960 (essa fração entrou em declínio nos últimos 40 anos). Por que os motores CC eram tão comuns, mesmo quando os próprios sistemas de potência CC eram bastante raros?

Havia diversas razões da popularidade contínua dos motores CC. Uma delas era que os sistemas de potência CC foram, e ainda são, comuns em carros, tratores e aeronaves. Quando um veículo já dispõe de um sistema elétrico CC, faz sentido considerar o uso de motores CC. Outra aplicação dos motores CC era nos casos em que havia necessidade de uma ampla faixa de velocidades. Antes do uso generalizado de retificadores e inversores baseados em eletrônica de potência, os motores CC eram insuperáveis em aplicações de controle de velocidade. Mesmo quando não havia fontes CC de potência, circuitos retificadores e outros de estado sólido eram usados para criar a potência elétrica CC necessária, e os motores CC eram usados para propiciar o controle de velocidade desejado. (Atualmente, no lugar dos motores CC, a escolha preferida para a maioria das aplicações de controle de velocidade é o motor de indução com unidades de acionamento de estado sólido. Entretanto, ainda há algumas aplicações em que os motores CC são os preferidos.)

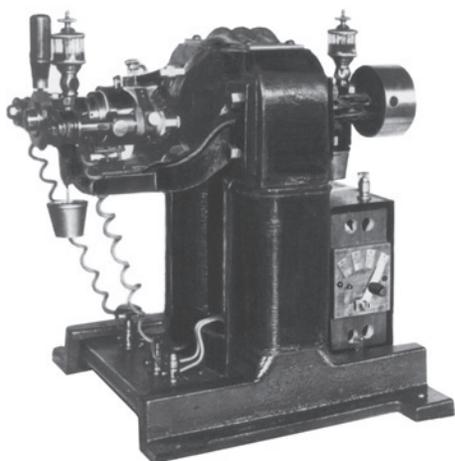
Frequentemente, os motores CC são comparados por sua regulação de velocidade. A *regulação de velocidade* (RV) de um motor é definida por

$$RV = \frac{\omega_{m,vz} - \omega_{m,pc}}{\omega_{m,pc}} \times 100\% \quad (8-1)$$

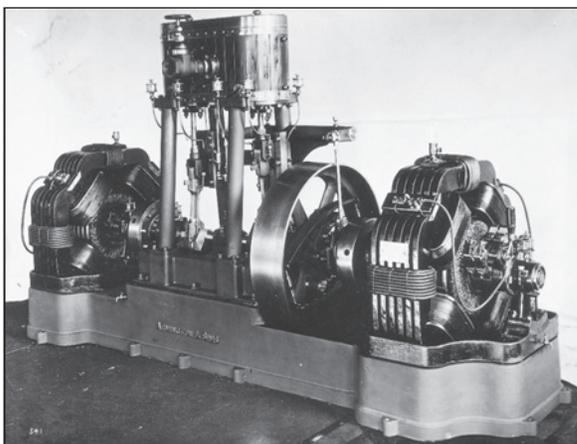
$$RV = \frac{n_{m,vz} - n_{m,pc}}{n_{m,pc}} \times 100\% \quad (8-2)$$

A regulação de velocidade é uma medida rudimentar da forma da curva característica do conjugado *versus* velocidade do motor – uma regulação de velocidade positiva significa que a velocidade do motor cai com o aumento de carga e uma regulação de velocidade negativa significa que a velocidade do motor sobe com o aumento de carga. O valor da regulação de velocidade indica aproximadamente quão acentuada é a inclinação da curva de conjugado *versus* velocidade.

Naturalmente, os motores CC são acionados a partir de uma fonte de potência CC. A não ser que seja especificado em contrário, *assumiremos que a tensão de entrada de um motor CC é constante*, porque essa suposição simplifica a análise dos motores e a comparação entre os diferentes tipos de motores.



(a)



(b)

FIGURA 8-1

Motores CC primitivos. (a) Um dos primeiros motores CC, o qual foi construído por Elihu Thompson em 1886. Sua potência nominal era de 1/2 HP. (*Cortesia de General Electric Company.*) (b) Um motor CC maior de quatro polos construído em torno de 1900. Observe a alavanca para deslocar as escovas do plano neutro. (*Cortesia de General Electric Company.*)

Há cinco tipos principais de motores CC de uso geral:

1. O motor CC de excitação independente
2. O motor CC em derivação
3. O motor CC de ímã permanente
4. O motor CC série
5. O motor CC composto

A seguir, cada um desses tipos será examinado.

8.2 O CIRCUITO EQUIVALENTE DE UM MOTOR CC

O circuito equivalente de um motor CC está mostrado na Figura 8-2. Nessa figura, o circuito de armadura é representado por uma fonte de tensão ideal E_A e um resistor R_A . Essa representação é na realidade o equivalente Thévenin da estrutura completa do rotor, incluindo as bobinas do rotor, os interpolos e os enrolamentos de compensação, se presentes. A queda de tensão nas escovas é representada por uma pequena bateria V_{escova} que se opõe à corrente que circula na máquina. As bobinas de campo, que produzem o fluxo magnético do gerador, são representadas pelo indutor L_F e pelo resistor R_F . O resistor separado R_{aj} representa um resistor externo variável, usado para controlar a corrente que circula no circuito de campo.

Há algumas variações e simplificações desse circuito equivalente básico. A queda de tensão nas escovas é frequentemente apenas uma fração mínima da tensão gerada em uma máquina. Portanto, em casos não muito críticos, a queda de tensão nas escovas pode ser desprezada ou incluída de forma aproximada no valor de R_A . Além disso, algumas vezes a resistência interna das bobinas de campo é combinada com o resistor variável e a resistência total é denominada R_F (veja Figura 8-2b). Uma terceira variação é que alguns geradores têm mais do que uma bobina de campo, todas as quais são incluídas no circuito equivalente.

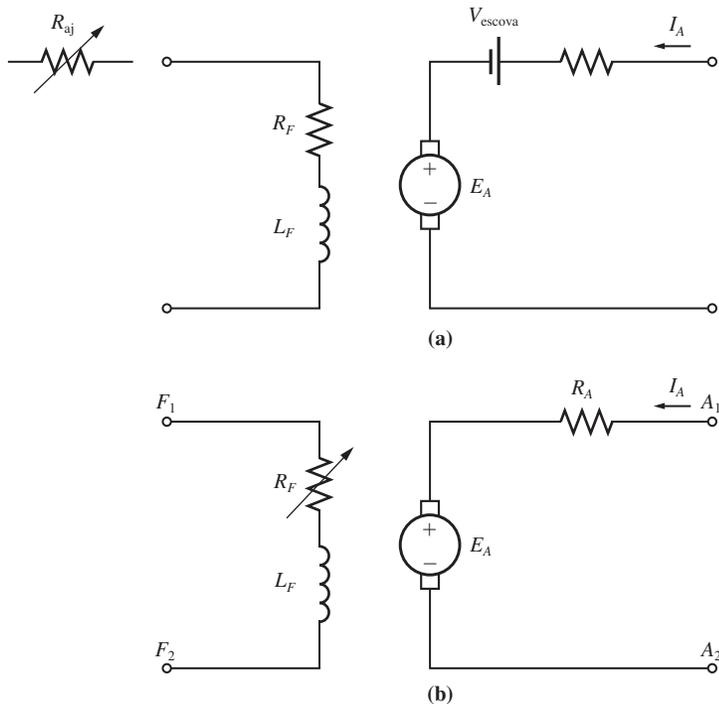


FIGURA 8-2

(a) O circuito equivalente de um motor CC. (b) Um circuito equivalente simplificado em que a queda de tensão nas escovas foi eliminada e R_{aj} foi combinada com a resistência de campo.

A tensão gerada interna dessa máquina é dada pela equação

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

e o conjugado induzido desenvolvido pela máquina é dado por

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

Essas duas equações, a curva de magnetização da máquina e a equação de Kirchhoff das tensões da armadura são as ferramentas de que necessitamos para analisar o comportamento e o desempenho de um motor CC.

8.3 A CURVA DE MAGNETIZAÇÃO DE UMA MÁQUINA CC

A tensão interna gerada E_A de um motor ou gerador CC é dada pela Equação (7-38):

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

Portanto, E_A é diretamente proporcional ao fluxo e à velocidade de rotação da máquina. Como a tensão interna gerada relaciona-se com a corrente de campo da máquina?

A corrente de campo em uma máquina CC produz uma força magnetomotriz de campo que é dada por $\mathcal{F} = N_f I_f$. Essa força magnetomotriz produz um fluxo na máquina de acordo com a curva de magnetização (Figura 8-3). Como a corrente de campo é diretamente proporcional à força magnetomotriz e, como E_A é diretamente proporcional ao fluxo, é costume apresentar a curva de magnetização como um gráfico de E_A versus a corrente de campo, para uma dada velocidade ω_0 (Figura 8-4).

É importante observar que, para obter a máxima potência possível por quilograma de uma máquina, a maioria dos motores e geradores é projetada para operar próximo do ponto de saturação na curva de magnetização (no joelho da curva). Isso significa que frequentemente um incremento bem grande da corrente de campo é

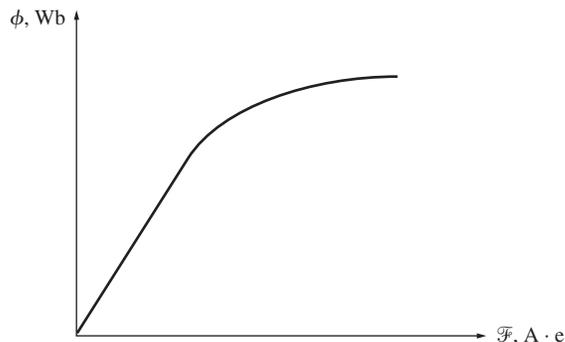


FIGURA 8-3

A curva de magnetização de um material ferromagnético (ϕ versus \mathcal{F}).

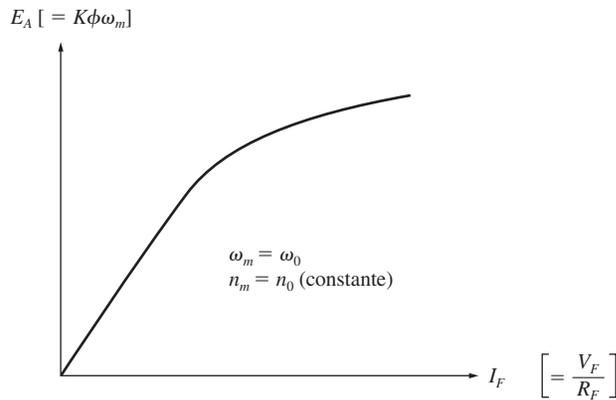


FIGURA 8-4
 A curva de magnetização de uma máquina CC, expressa como um gráfico de E_A versus I_F , para uma velocidade fixa ω_0 .

necessário para obter um pequeno aumento em E_A quando o ponto de operação está próximo da plena carga.

As curvas de magnetização usadas neste livro estão disponíveis também em forma eletrônica para simplificar a solução dos problemas usando MATLAB. Cada curva de magnetização está armazenada em um arquivo MAT separado. Cada um desses arquivos contém três variáveis: *if_values*, que contém os valores da corrente de campo (*field*), *ea_values*, que contém os valores correspondentes de E_A , *n_0*, que contém a velocidade na qual a curva de magnetização foi medida, sendo dada em rotações por minuto.

8.4 OS MOTORES DE EXCITAÇÃO INDEPENDENTE E EM DERIVAÇÃO

O circuito equivalente de um motor de excitação independente está mostrado na Figura 8-5a e o circuito equivalente de um motor CC em derivação (conhecido também como motor *shunt* ou ainda em paralelo) está mostrado na Figura 8-5b. Um motor CC de excitação independente é um motor cujo circuito de campo é alimentado a partir de uma fonte isolada de tensão constante, ao passo que um motor CC em derivação é um motor cujo circuito de campo é alimentado diretamente dos terminais de armadura do próprio motor. Na prática, quando a tensão da fonte de alimentação de um motor é constante, não há nenhuma diferença de comportamento entre esses dois tipos de máquinas. A não ser que seja especificado em contrário, sempre que o comportamento de um motor em derivação for descrito, também estaremos incluindo o motor de excitação independente.

A equação da lei de Kirchhoff das tensões (LKT) para o circuito de armadura desses motores é

$$V_T = E_A + I_A R_A \tag{8-3}$$

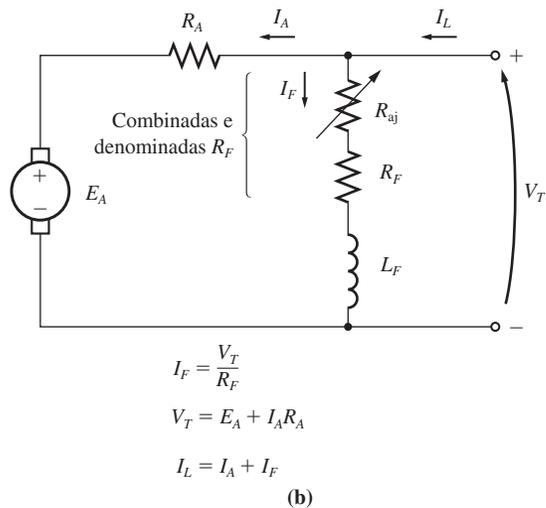
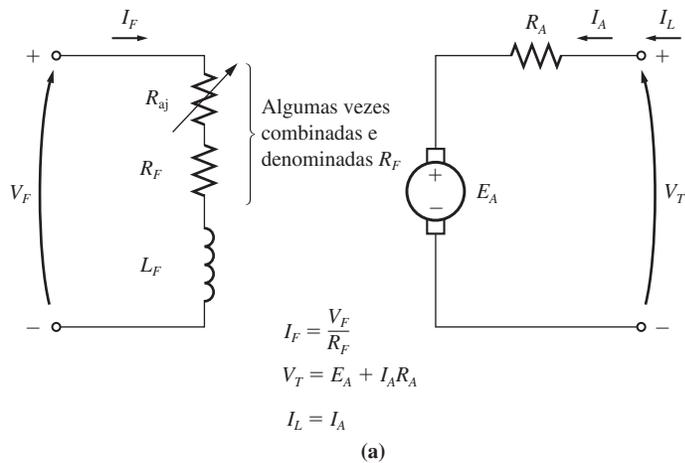


FIGURA 8-5

(a) O circuito equivalente de um motor CC de excitação independente. (b) O circuito equivalente de um motor CC em derivação (*shunt*).

A característica de terminal de um motor CC em derivação

A característica de terminal de uma máquina é um gráfico que envolve as grandezas de saída da máquina. Para um motor, as grandezas de saída são o conjugado no eixo e a velocidade. Assim, a característica de terminal de um motor é um gráfico do seu *conjugado de saída versus a velocidade*.

Como um motor CC em derivação responde a uma carga? Suponha que a carga no eixo de um motor CC em derivação seja aumentada. Nesse caso, o conjugado de carga τ_{carga} excederá o conjugado induzido τ_{ind} na máquina e o motor começará a perder velocidade. Quando isso acontece, a tensão interna gerada diminui ($E_A = K\phi\omega_m \downarrow$) e conseqüentemente a corrente de armadura do motor $I_A = (V_T - E_A \downarrow)/R_A$ aumenta. Ao aumentar a corrente, o conjugado induzido cresce ($\tau_{\text{ind}} = K\phi I_A \uparrow$) até ser igual ao conjugado de carga, em uma velocidade mecânica de rotação ω_m mais baixa.

A característica de saída de um motor CC em derivação pode ser obtida a partir das equações da tensão induzida e do conjugado mais a lei de Kirchoff das tensões (LKT). A equação LKT para um motor CC em derivação é

$$V_T = E_A + I_A R_A \quad (8-3)$$

A tensão induzida é $E_A = K\phi\omega_m$. Assim,

$$V_T = K\phi\omega_m + I_A R_A \quad (8-4)$$

Como $\tau_{\text{ind}} = K\phi I_A$, a corrente I_A pode ser expressa como

$$I_A = \frac{\tau_{\text{ind}}}{K\phi} \quad (8-5)$$

Combinando as Equações (8-4) e (8-5), obtemos

$$V_T = K\phi\omega_m + \frac{\tau_{\text{ind}}}{K\phi} R_A \quad (8-6)$$

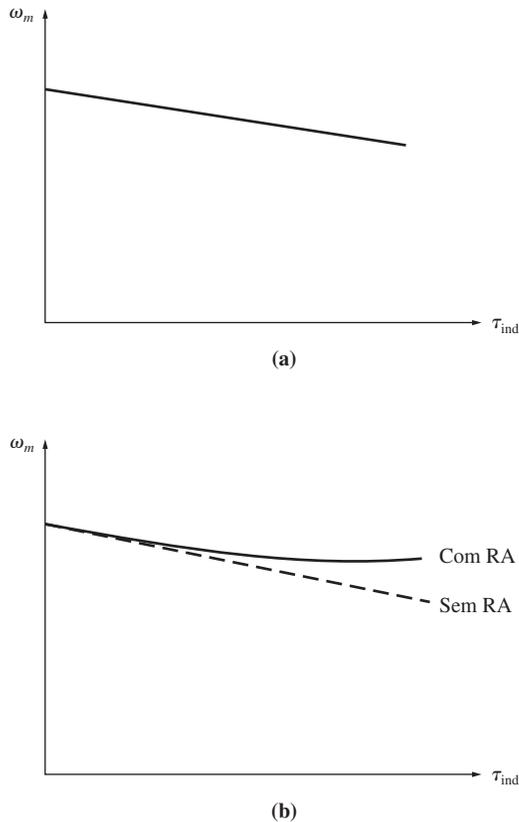
Finalmente, isolando a velocidade do motor, temos

$$\omega_m = \frac{V_T}{K\phi} - \frac{R_A}{(K\phi)^2} \tau_{\text{ind}} \quad (8-7)$$

Essa equação é simplesmente uma linha reta com uma inclinação negativa. A característica resultante de conjugado *versus* velocidade de um motor CC em derivação está mostrada na Figura 8-6a.

É importante ter em mente que, para a velocidade do motor variar linearmente com o conjugado, os outros termos dessa expressão deverão ser constantes quando a carga variar. Estamos supondo que a tensão de terminal fornecida pela fonte de tensão CC seja constante – se assim não for, então as variações de tensão afetarão a forma da curva de conjugado *versus* velocidade.

Outro efeito *interno do motor* que também pode afetar a forma da curva de conjugado *versus* velocidade é a reação de armadura. Se um motor apresentar reação de armadura, então os efeitos de enfraquecimento de fluxo *reduzirão* o seu fluxo quando a carga aumentar. Como a Equação (8-7) mostra, para qualquer carga, o efeito de uma redução de fluxo é o aumento da velocidade do motor em relação à velocidade na qual o motor giraria se não houvesse a reação de armadura. A característica de conjugado *versus* velocidade de um motor CC em derivação com reação de armadu-

**FIGURA 8-6**

(a) Característica de conjugado *versus* velocidade de um motor CC em derivação ou de excitação independente, com enrolamentos de compensação para eliminar a reação de armadura. (b) Característica de conjugado *versus* velocidade de um motor em que a reação de armadura está presente.

ra está mostrada na Figura 8-6b. Naturalmente, se um motor tiver enrolamentos de compensação, não haverá problemas de enfraquecimento de fluxo na máquina, o qual será constante.

Se houver enrolamentos de compensação em um motor CC em derivação, de modo que *seu fluxo seja constante independentemente da carga*, e se a velocidade e a corrente de armadura do motor forem conhecidas para qualquer valor de carga, então sua velocidade poderá ser calculada para qualquer outro valor de carga, desde que a corrente de armadura para aquela carga seja conhecida ou possa ser determinada. O Exemplo 8-1 ilustra esse cálculo.

EXEMPLO 8-1 Um motor CC em derivação de 50 HP, 250 V e 1200 rpm, com enrolamentos de compensação, tem uma resistência de armadura (incluindo as escovas, os enrolamentos de

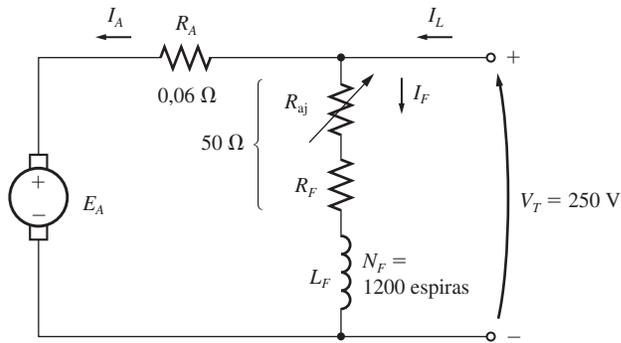


FIGURA 8-7
O motor CC em derivação do Exemplo 8-1.

compensação e os interpolos) de $0,06 \Omega$. Seu circuito de campo tem uma resistência total de $R_{aj} + R_F$ de 50Ω , produzindo uma velocidade *a vazão* de 1200 rpm. Há 1200 espiras por polo no enrolamento do campo em derivação (veja a Figura 8-7).

- (a) Encontre a velocidade desse motor quando a corrente de entrada é 100 A.
- (b) Encontre a velocidade desse motor quando a corrente de entrada é 200 A.
- (c) Encontre a velocidade desse motor quando a corrente de entrada é 300 A.
- (d) Plote a característica de conjugado *versus* velocidade do motor.

Solução

A tensão interna gerada de uma máquina CC, com a velocidade expressa em rotações por minuto, é dada por

$$E_A = K' \phi n_m \tag{7-41}$$

Como a corrente de campo da máquina é constante (porque V_T e a resistência de campo são ambas constantes), e como não há efeitos de reação de armadura, *o fluxo nesse motor é constante*. A relação entre as velocidades e as tensões geradas internas do motor, para duas condições diferentes de carga, será

$$\frac{E_{A2}}{E_{A1}} = \frac{K' \phi n_{m2}}{K' \phi n_{m1}} \tag{8-8}$$

A constante K' é cancelada, porque ela é uma constante para qualquer máquina dada, e o fluxo ϕ também é cancelado, como foi descrito anteriormente. Portanto,

$$n_{m2} = \frac{E_{A2}}{E_{A1}} n_{m1} \tag{8-9}$$

A vazão, a corrente de armadura é zero, de modo que $E_{A1} = V_T = 250 \text{ V}$, ao passo que a velocidade $n_{m1} = 1200 \text{ rpm}$. Se pudermos calcular a tensão interna gerada para qualquer outra carga, será possível determinar a velocidade para essa carga a partir da Equação (8-9).

(a) Se $I_L = 100$ A, então a corrente de armadura do motor será

$$\begin{aligned} I_A &= I_L - I_F = I_L - \frac{V_T}{R_F} \\ &= 100 \text{ A} - \frac{250 \text{ V}}{50 \Omega} = 95 \text{ A} \end{aligned}$$

Portanto, E_A para essa carga será

$$\begin{aligned} E_A &= V_T - I_A R_A \\ &= 250 \text{ V} - (95 \text{ A})(0,06 \Omega) = 244,3 \text{ V} \end{aligned}$$

A velocidade resultante do motor será

$$n_{m2} = \frac{E_{A2}}{E_{A1}} n_{m1} = \frac{244,3 \text{ V}}{250 \text{ V}} 1200 \text{ rpm} = 1173 \text{ rpm}$$

(b) Se $I_L = 200$ A, então a corrente de armadura do motor será

$$I_A = 200 \text{ A} - \frac{250 \text{ V}}{50 \Omega} = 195 \text{ A}$$

Portanto, E_A para essa carga será

$$\begin{aligned} E_A &= V_T - I_A R_A \\ &= 250 \text{ V} - (195 \text{ A})(0,06 \Omega) = 238,3 \text{ V} \end{aligned}$$

A velocidade resultante do motor será

$$n_{m2} = \frac{E_{A2}}{E_{A1}} n_{m1} = \frac{238,3 \text{ V}}{250 \text{ V}} 1200 \text{ rpm} = 1144 \text{ rpm}$$

(c) Se $I_L = 300$ A, então a corrente de armadura do motor será

$$\begin{aligned} I_A &= I_L - I_F = I_L - \frac{V_T}{R_F} \\ &= 300 \text{ A} - \frac{250 \text{ V}}{50 \Omega} = 295 \text{ A} \end{aligned}$$

Portanto, E_A para essa carga será

$$\begin{aligned} E_A &= V_T - I_A R_A \\ &= 250 \text{ V} - (295 \text{ A})(0,06 \Omega) = 232,3 \text{ V} \end{aligned}$$

A velocidade resultante do motor será

$$n_{m2} = \frac{E_{A2}}{E_{A1}} n_{m1} = \frac{232,3 \text{ V}}{250 \text{ V}} 1200 \text{ rpm} = 1115 \text{ rpm}$$

(d) Para plotar a característica de saída desse motor, será necessário encontrar o conjugado correspondente a cada valor de velocidade. A vazio, o conjugado induzido τ_{ind} é claramente zero. O conjugado induzido para qualquer outra carga pode ser obtido com base no fato de que a potência convertida em um motor CC é

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

(7-55, 7-56)

Dessa equação, temos que o conjugado induzido em um motor é

$$\tau_{\text{ind}} = \frac{E_A I_A}{\omega_m} \tag{8-10}$$

Portanto, quando $I_L = 100 \text{ A}$, o conjugado induzido é

$$\tau_{\text{ind}} = \frac{(244,3 \text{ V})(95 \text{ A})}{(1173 \text{ rotações/min})(1 \text{ min}/60\text{s})(2\pi \text{ rad/rotação})} = 190 \text{ N} \cdot \text{m}$$

Quando $I_L = 200 \text{ A}$, o conjugado induzido é

$$\tau_{\text{ind}} = \frac{(238,3 \text{ V})(95 \text{ A})}{(1144 \text{ rotações/min})(1 \text{ min}/60\text{s})(2\pi \text{ rad/rotação})} = 388 \text{ N} \cdot \text{m}$$

Quando $I_L = 300 \text{ A}$, o conjugado induzido é

$$\tau_{\text{ind}} = \frac{(232,3 \text{ V})(295 \text{ A})}{(1115 \text{ rotações/min})(1 \text{ min}/60\text{s})(2\pi \text{ rad/rotação})} = 587 \text{ N} \cdot \text{m}$$

A característica resultante de conjugado *versus* velocidade desse motor está plotada na Figura 8-8.

Análise não linear de um motor CC em derivação

O fluxo ϕ e, conseqüentemente, a tensão interna gerada E_A de uma máquina CC é uma função *não linear* de sua força magnetomotriz. Portanto, qualquer coisa que altere a força magnetomotriz de uma máquina produzirá um efeito não linear sobre

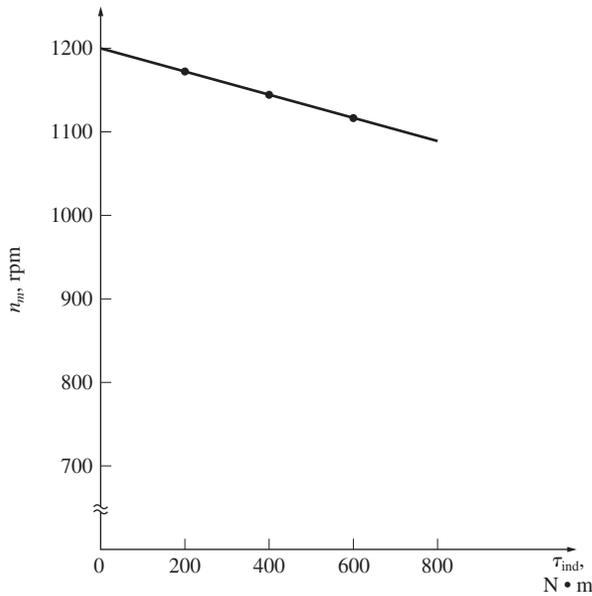


FIGURA 8-8
A característica de conjugado *versus* velocidade do motor do Exemplo 8-1.

a tensão interna gerada da máquina. Como não é possível calcular analiticamente as alterações de E_A , devemos usar a curva de magnetização da máquina para determinar com exatidão sua E_A , para uma dada força magnetomotriz. As duas contribuições principais para a força magnetomotriz da máquina vêm de sua corrente de campo e de sua reação de armadura, se esta estiver presente.

Como a curva de magnetização é um gráfico direto de E_A versus I_F para uma dada velocidade ω_o , o efeito de mudança na corrente de campo da máquina pode ser determinado diretamente de sua curva de magnetização.

Se uma máquina apresentar reação de armadura, seu fluxo será reduzido a cada aumento de carga. Em um motor CC em derivação, a força magnetomotriz total é a força magnetomotriz do circuito de campo menos a força magnetomotriz originária da reação de armadura (RA):

$$\mathcal{F}_{\text{liq}} = N_F I_F - \mathcal{F}_{RA} \quad (8-11)$$

Como as curvas de magnetização são expressas como gráficos de E_A versus a corrente de campo, costuma-se definir uma *corrente de campo equivalente*, a qual produz a mesma tensão de saída que a combinação de todas as forças magnetomotrizes da máquina. Se localizarmos a corrente de campo equivalente na curva de magnetização, então poderemos determinar a tensão resultante E_A . A corrente de campo equivalente de um motor CC em derivação é dada por

$$I_F^* = I_F - \frac{\mathcal{F}_{RA}}{N_F} \quad (8-12)$$

Há outro efeito que deve ser considerado quando se usa a análise não linear para determinar a tensão interna gerada de um motor CC. As curvas de magnetização de uma máquina são plotadas para uma dada velocidade em particular, usualmente a velocidade nominal. Como poderemos determinar os efeitos de uma dada corrente de campo se o motor estiver girando em uma velocidade diferente da nominal?

Quando a velocidade é expressa em rotações por minuto, a equação da tensão induzida em uma máquina CC é

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

Para uma dada corrente de campo efetiva, o fluxo em uma máquina é fixo. Desse modo, a tensão interna gerada relaciona-se com a velocidade através de

$$\boxed{\frac{E_A}{E_{A0}} = \frac{n_m}{n_0}} \quad (8-13)$$

em que E_{A0} e n_0 representam os valores de referência de tensão e velocidade, respectivamente. Se as condições de referência forem conhecidas a partir da curva de magnetização e a tensão real E_A for obtida da lei de Kirchhoff das tensões, então será possível determinar a velocidade real n a partir da Equação (8-13). O uso da curva de magnetização e das Equações (8-12) e (8-13) serão ilustrados no exemplo seguinte, que analisa um motor CC com reação de armadura.

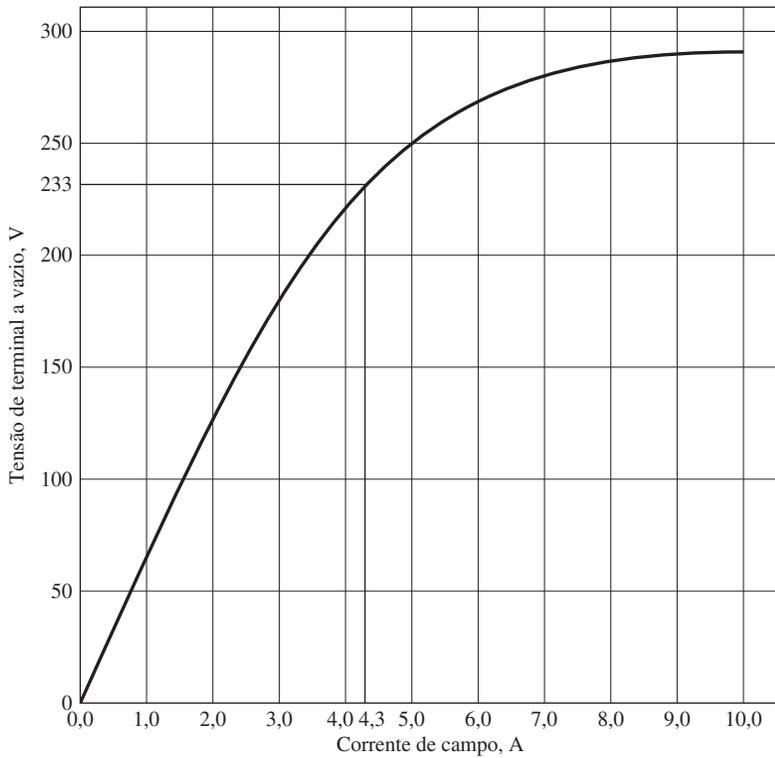


FIGURA 8-9

A curva de magnetização de um motor CC típico de 250 V, plotada para uma velocidade de 1200 rpm.

EXEMPLO 8-2 Um motor CC em derivação de 50 HP, 250 V e 1200 rpm, *sem* enrolamentos de compensação, tem uma resistência de armadura (incluindo as escovas e os interpolos) de 0,06 Ω. Seu circuito de campo tem uma resistência total de $R_F + R_{aj}$ de 50 Ω, produzindo uma velocidade *a vazio* de 1200 rpm. No enrolamento do campo em derivação, há 1200 espiras por polo. A reação de armadura produz uma força magnetomotriz desmagnetizante de 840 A • e para uma corrente de campo de 200 A. A curva de magnetização dessa máquina está mostrada na Figura 8-9.

- (a) Encontre a velocidade desse motor quando a sua corrente de entrada é 200 A.
- (b) Basicamente, esse motor é idêntico ao do Exemplo 8-1, exceto pelo fato de que os enrolamentos de compensação estão ausentes. Como essa velocidade pode ser comparada com a do motor anterior para uma corrente de carga de 200 A?
- (c) Calcule e plote a característica de conjugado *versus* velocidade do motor.

Solução

(a) Se $I_L = 200$ A, então a corrente de armadura do motor será

$$\begin{aligned}
 I_A &= I_L - I_F = I_L - \frac{V_T}{R_F} \\
 &= 200 \text{ A} - \frac{250 \text{ V}}{50 \Omega} = 195 \text{ A}
 \end{aligned}$$

Portanto, a tensão interna gerada da máquina será

$$\begin{aligned} E_A &= V_T - I_A R_A \\ &= 250 \text{ V} - (195 \text{ A})(0,06 \Omega) = 238,3 \text{ V} \end{aligned}$$

Com $I_L = 200 \text{ A}$, a força magnetomotriz desmagnetizante vinda da reação de armadura é $840 \text{ A} \cdot \text{e}$, de modo que a corrente efetiva do campo em derivação do motor é

$$\begin{aligned} I_F^* &= I_F - \frac{\mathcal{F}_{RA}}{N_F} \\ &= 5,0 \text{ A} - \frac{840 \text{ A} \cdot \text{e}}{1200 \text{ e}} = 4,3 \text{ A} \end{aligned} \quad (8-12)$$

Da curva de magnetização, vemos que essa corrente efetiva de campo produz uma tensão interna gerada E_{A0} de 233 V para uma velocidade n_0 de 1200 rpm.

Sabemos que a tensão interna gerada seria 233 V para uma velocidade de 1200 rpm. Como a tensão interna gerada real E_A é 238,3 V, a velocidade real de funcionamento do motor deve ser

$$\begin{aligned} \frac{E_A}{E_{A0}} &= \frac{n_m}{n_0} \\ n_m &= \frac{E_A}{E_{A0}} n_0 = \frac{238,3 \text{ V}}{233 \text{ V}} (1200 \text{ rpm}) = 1227 \text{ rpm} \end{aligned} \quad (8-13)$$

- (b) No Exemplo 8-1, para 200 A de carga, a velocidade do motor era $n_m = 1144 \text{ rpm}$. Neste exemplo, a velocidade do motor é 1227 rpm. *Observe que a velocidade do motor com reação de armadura é superior à velocidade do motor sem reação de armadura.* Esse aumento relativo de velocidade é devido ao enfraquecimento de fluxo da máquina com a reação de armadura.
- (c) Para obter a característica de conjugado *versus* velocidade do motor, devemos calcular o conjugado e a velocidade para muitas condições diferentes de carga. Infelizmente, a força magnetomotriz desmagnetizante da reação de armadura é dada apenas para uma condição de carga (200 A). Como não há informação adicional disponível, iremos assumir que a força de \mathcal{F}_{RA} varia linearmente com a corrente de carga.

Um programa (*M-file*) de MATLAB que automatiza esse cálculo e plota a característica resultante de conjugado *versus* velocidade será mostrado a seguir. Ele realiza os mesmos passos da parte *a*, determinando a velocidade para cada corrente de carga e então calculando o conjugado induzido para essa velocidade. Observe que ele lê a curva de magnetização de um arquivo de nome `fig8_9.mat`. Esse arquivo e as outras curvas de magnetização deste capítulo estão disponíveis para *download* no *site* do livro (veja os detalhes no Prefácio).

```
% M-file: shunt_ts_curve.m
% M-file para plotar a curva de conjugado versus velocidade do
% motor CC em derivação com reação de armadura do
% Exemplo 8-2.

% Obtenha a curva de magnetização. Este arquivo contém as três
% variáveis if_value (valor da corrente de campo), ea_value e n_0.
load fig8_9.mat

% Primeiro, inicialize os valores necessários a este programa.
v_t = 250; % Tensão de terminal (em V)
```

```

r_f = 50; % Resistência de campo (em ohms)
r_a = 0.06; % Resistência de armadura (em ohms)
i_l = 10:10:300; % Correntes de linha (em A)
n_f = 1200; % Número de espiras de campo
f_ar0 = 840; % Reação de armadura para 200 A (em A.e/m)

% Calcule a corrente de armadura para cada carga.
i_a = i_l - v_t / r_f;

% Agora, calcule a tensão interna gerada para
% cada corrente de armadura.
e_a = v_t - i_a * r_a;

% Calcule a FMM da reação de armadura para
% cada corrente de armadura.
f_ar = (i_a / 200) * f_ar0;

% Calcule a corrente de campo efetiva.
i_f = v_t / r_f - f_ar / n_f;

% Calcule a tensão interna gerada resultante para
% 1200 rpm interpolando a curva de magnetização do
% motor.
e_a0 = interp1(if_values,ea_values,i_f,'spline');

% Calcule a velocidade resultante a partir da Equação (8-13).
n = (e_a./ e_a0) * n_0;

% Calcule o conjugado induzido correspondente a cada
% velocidade a partir das Equações (7-55) e (7-56).
t_ind = e_a.* i_a./ (n * 2 * pi / 60);

% Plote a curva de conjugado versus velocidade
plot(t_ind,n,'k-','LineWidth',2.0);
hold on;
xlabel('\bf\tau_{ind} (N-m)');
ylabel('\bf\itn_{m} (rpm)');
title ('\bfCaracterística de conjugado versus velocidade de um motor
CC em derivação');
axis([ 0 600 1100 1300]);
grid on;
hold off;

```

A característica de conjugado *versus* velocidade resultante está mostrada na Figura 8-10. Observe que, para qualquer carga dada, a velocidade do motor com reação de armadura é superior à velocidade do motor sem reação de armadura.

Controle de velocidade de um motor CC em derivação

Como se pode controlar a velocidade de um motor CC em derivação? Há dois métodos comuns em uso e outro menos comum. Os métodos de uso comum já foram vistos na máquina linear simples do Capítulo 1 e na espira simples em rotação do Capítulo 7. Os dois modos comuns de se controlar a velocidade de um motor CC em derivação são

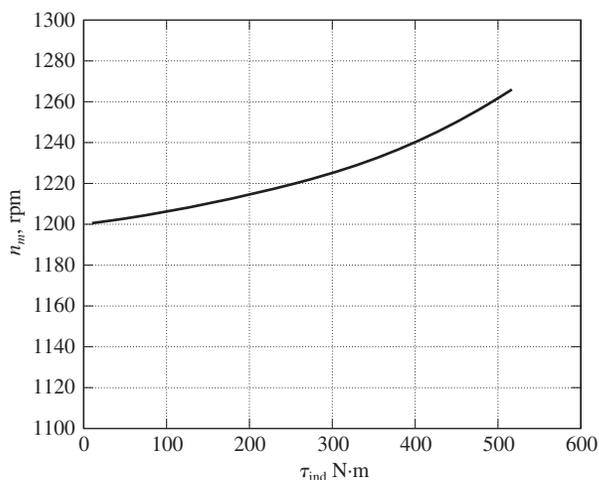


FIGURA 8-10

A característica de conjugado *versus* velocidade do motor com reação de armadura do Exemplo 8-2.

1. Ajuste da resistência de campo R_F (e conseqüentemente do fluxo de campo)
2. Ajuste da tensão de terminal aplicada à armadura

O método menos comum de se controlar a velocidade é

3. Inserção de um resistor em série com o circuito de armadura.

Cada um desses métodos será descrito detalhadamente a seguir.

ALTERAÇÃO DA RESISTÊNCIA DE CAMPO. Para compreender o que acontece quando o resistor de campo de um motor CC é mudado, assuma que o resistor de campo aumente de valor e observe a resposta. Se a resistência de campo aumentar, então a corrente de campo diminuirá ($I_F = V_T/R_F \uparrow$) e, quando isso acontecer, o fluxo ϕ também diminuirá junto. Uma diminuição de fluxo causa uma queda instantânea na tensão gerada interna, $E_A (= K\phi\omega_m)$, o que leva a um grande aumento de corrente de armadura na máquina, porque

$$I_A \uparrow = \frac{V_T - E_A \downarrow}{R_A}$$

O conjugado induzido em um motor é dado por $\tau_{ind} = K\phi I_A$. Já que o fluxo ϕ dessa máquina diminui quando a corrente I_A aumenta, de que forma se dará a variação do conjugado induzido? O modo mais fácil de responder a essa pergunta é através de um exemplo. A Figura 8-11 mostra um motor CC em derivação com uma resistência interna de $0,25 \Omega$. No momento, ele está operando com uma tensão de terminal de 250 V e uma tensão gerada interna de 245 V. Portanto, a corrente de armadura é $I_A = (250 \text{ V} - 245 \text{ V})/0,25 \Omega = 20 \text{ A}$. Que acontecerá nesse motor *se houver uma diminuição de fluxo de 1%*? Se o fluxo diminuir em 1%, então E_A deverá diminuir também em 1%, porque $E_A = K\phi\omega_m$. Portanto, E_A baixará para

$$E_{A2} = 0,99 E_{A1} = 0,99(245 \text{ V}) = 242,55 \text{ V}$$

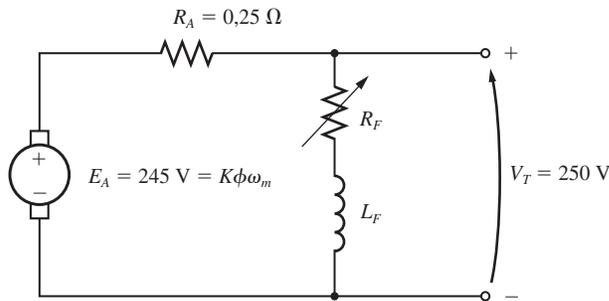


FIGURA 8-11

Um motor CC em derivação de 250 V com valores típicos de E_A e R_A .

Então, a corrente de armadura deverá se elevar para

$$I_A = \frac{250 \text{ V} - 242,55 \text{ V}}{0,25 \Omega} = 29,8 \text{ A}$$

Portanto, uma diminuição de 1% no fluxo produziu um aumento de 49% na corrente de armadura.

Assim, voltando à discussão original, o aumento de corrente predomina sobre a diminuição de fluxo e o conjugado induzido sobe:

$$\tau_{\text{ind}} = K \phi \overset{\downarrow}{\overset{\uparrow}{I_A}}$$

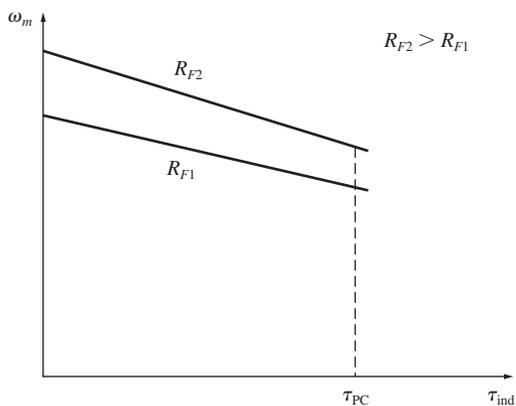
Como $\tau_{\text{ind}} > \tau_{\text{carga}}$, a velocidade do motor aumenta.

Entretanto, quando o motor aumenta de velocidade, a tensão gerada interna E_A sobe, fazendo I_A cair. Quando I_A diminui, o conjugado induzido τ_{ind} também cai e finalmente τ_{ind} iguala-se novamente a τ_{carga} , em uma velocidade de regime permanente superior à original.

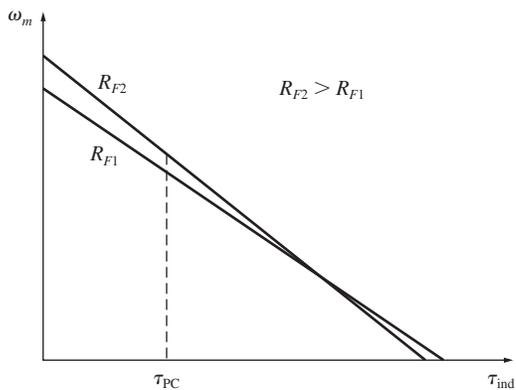
Resumindo o comportamento de causa e efeito envolvido neste método de controle de velocidade, temos:

1. O aumento de R_F faz $I_F (= V_T/R_F \uparrow)$ diminuir.
2. A diminuição de I_F diminui ϕ .
3. A diminuição de ϕ baixa $E_A (= K\phi\downarrow\omega_m)$.
4. A diminuição de E_A aumenta $I_A (= V_T - E_A \downarrow)/R_A$.
5. O aumento de I_A eleva $\tau_{\text{ind}} (= K\phi\downarrow I_A \uparrow)$, sendo que a alteração em I_A predomina sobre a variação de fluxo.
6. A elevação de τ_{ind} torna $\tau_{\text{ind}} > \tau_{\text{carga}}$ e a velocidade ω_m sobe.
7. O aumento de ω_m eleva $E_A = K\phi\omega_m \uparrow$ novamente.
8. A elevação de E_A diminui I_A .
9. A diminuição de I_A reduz τ_{ind} até que $\tau_{\text{ind}} = \tau_{\text{carga}}$ em uma velocidade ω_m mais elevada.

O efeito do aumento da resistência de campo sobre a característica de saída de um motor em derivação está mostrado na Figura 8-12a. Observe que, quando o fluxo



(a)



(b)

FIGURA 8-12

O efeito do controle de velocidade por resistência de campo sobre a característica de conjugado *versus* velocidade de um motor CC em derivação: (a) intervalo normal de funcionamento do motor até plena carga; (b) intervalo completo desde a vazio até a condição de parada.

na máquina diminui, a velocidade a vazio do motor aumenta, ao passo que a inclinação da curva de conjugado *versus* velocidade torna-se mais acentuada. Naturalmente, a diminuição de R_f inverte o processo inteiro e a velocidade do motor diminui.

UMA PRECAUÇÃO EM RELAÇÃO AO CONTROLE DE VELOCIDADE USANDO RESISTÊNCIA DE CAMPO. O efeito do aumento da resistência de campo sobre a característica de saída de um motor CC em derivação está mostrado na Figura 8-12. Observe que, quando o fluxo na máquina diminui, a velocidade a vazio do motor aumenta, ao passo que a inclinação da curva de conjugado *versus* velocidade torna-se mais acentuada. Essa forma é uma consequência da Equação (8-7), que descreve a característica de terminal do motor. Na Equação (8-7), a velocidade a vazio é proporcional ao inverso do fluxo do motor, ao passo que a inclinação da curva é proporcional ao inverso do quadrado do fluxo. Portanto, uma diminuição de fluxo faz a característica de conjugado *versus* velocidade tornar-se mais inclinada.

A Figura 8-12a mostra a característica de terminal de um motor no intervalo que vai desde sem carga, a vazio, até a condição de plena carga. Dentro dessa faixa, um aumento na resistência de campo eleva a velocidade do motor, como foi descrito

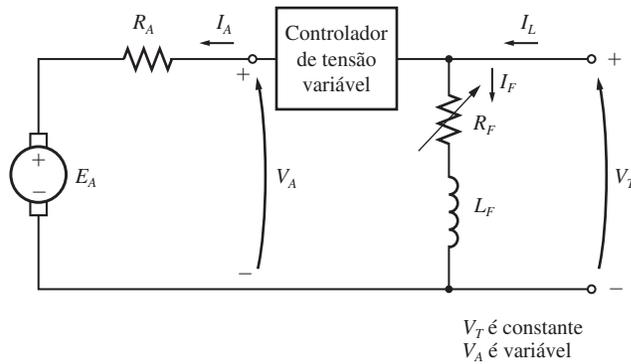


FIGURA 8-13
 Controle da tensão de armadura de um motor CC em derivação (ou de excitação independente).

anteriormente nesta seção. Para motores que operam nesse intervalo desde a vazio até plena carga, pode-se esperar com segurança que um incremento em R_F aumentará a velocidade de operação.

Agora, examine a Figura 8-12b. Essa figura mostra a característica de terminal do motor no intervalo inteiro, que vai desde a condição a vazio até a condição de parada do motor. É evidente nessa figura que, para velocidades *muito baixas*, um incremento da resistência de campo *diminuirá* a velocidade do motor na realidade. Esse efeito ocorre porque, em velocidades muito baixas, o aumento da corrente de armadura causado pela diminuição de E_A não é mais suficientemente grande para compensar a diminuição de fluxo da equação de conjugado induzido. Com a diminuição de fluxo, maior do que o aumento da corrente de armadura na realidade, o conjugado induzido diminui e o motor perde velocidade.

Na realidade, alguns motores CC de pequeno porte, usados para fins de controle, operam com velocidades próximas das condições de parada do motor. Nesses motores, um aumento da resistência de campo poderá não ter efeito, ou até mesmo diminuir a velocidade do motor. Como os resultados não são previsíveis, o controle de velocidade usando resistência de campo não deve ser usado com esses tipos de motores CC. Em vez disso, deve-se empregar o método de controle de velocidade pela tensão de armadura.

VARIAÇÃO DA TENSÃO DE ARMADURA. A segunda forma de controle de velocidade envolve a variação da tensão aplicada à armadura do motor *sem alterar a tensão aplicada ao campo*. Uma conexão similar à da Figura 8-13 é necessária para esse tipo de controle. De fato, o motor deve ser de *excitação independente* para se usar o controle por tensão de armadura.

Se a tensão V_A for incrementada, então a corrente de armadura do motor deverá subir [$I_A = (VA \uparrow - E_A)/R_A$]. À medida que I_A sobe, o conjugado induzido $\tau_{ind} = K\phi I_A \uparrow$ aumenta, tornando $\tau_{ind} > \tau_{carga}$ e fazendo a velocidade ω_m do motor aumentar.

No entanto, quando a velocidade ω_m cresce, a tensão interna gerada $E_A (= K\phi\omega_m \uparrow)$ aumenta, fazendo a corrente de armadura diminuir. Essa diminuição em I_A reduz o conjugado induzido, fazendo τ_{ind} ser igual a τ_{carga} em uma velocidade mais elevada de rotação.

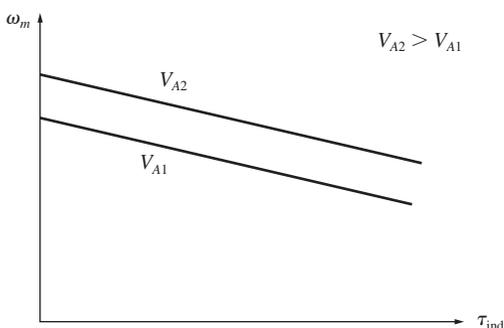


FIGURA 8-14

O efeito do controle de velocidade por tensão de armadura sobre a característica de conjugado *versus* velocidade de um motor em derivação.

Resumindo o comportamento de causa e efeito deste método de controle de velocidade, temos:

1. Um aumento de V_A eleva I_A [$(V_A \uparrow - E_A)/R_A$].
2. O aumento de I_A eleva τ_{ind} ($= K\phi I_A \uparrow$).
3. A elevação de τ_{ind} torna $\tau_{\text{ind}} > \tau_{\text{load}}$ fazendo a velocidade ω_m aumentar.
4. O aumento de ω_m eleva E_A ($= K\phi \omega_m \uparrow$).
5. A elevação de E_A diminui I_A [$= (V_A \uparrow - E_A)/R_A$].
6. A diminuição de I_A reduz τ_{ind} até que $\tau_{\text{ind}} = \tau_{\text{carga}}$ em uma velocidade ω_m mais elevada.

O efeito do aumento em V_A sobre a característica de conjugado *versus* velocidade de um motor de excitação independente está mostrado na Figura 8-14. Observe que a velocidade a vazio do motor é deslocada por esse método de controle de velocidade, mas a inclinação da curva permanece constante.

INSERÇÃO DE UM RESISTOR EM SÉRIE COM O CIRCUITO DE ARMADURA. Se um resistor for inserido em série com o circuito de armadura, o efeito será o aumento drástico da inclinação da característica de conjugado *versus* velocidade do motor, fazendo com que funcione mais lentamente quando receber uma carga (Figura 8-15). Isso pode ser visto facilmente a partir da Equação (8-7). A inserção de resistor é um método pouco eficiente de controle de velocidade, porque as perdas no resistor são muito elevadas. Por essa razão, esse método raramente é usado. Ele será encontrado somente em aplicações nas quais o motor passa quase todo o tempo funcionando a plena velocidade ou em aplicações cujo custo é demasiado baixo para justificar uma forma melhor de controle.

Os dois métodos mais comuns de controle da velocidade de um motor CC em derivação – variação de resistência de campo e variação da tensão de armadura – têm faixas diferentes de operação segura.

No controle por resistência de campo, quanto mais baixa for a corrente de campo de um motor CC em derivação (ou de excitação independente), mais rapidamente ele irá girar e, por outro lado, quanto maior for a corrente de campo, mais devagar ele irá girar. Como um aumento na corrente de campo causa uma diminuição de velocidade, sempre haverá uma velocidade mínima que pode ser atingida pelo controle do

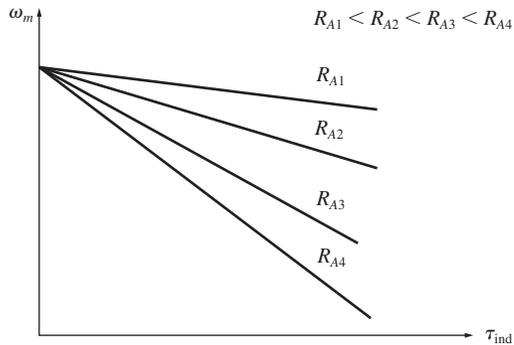


FIGURA 8-15

O efeito do controle de velocidade por resistência de armadura sobre a característica de conjugado *versus* velocidade do motor em derivação.

circuito de campo. Essa velocidade mínima ocorre quando a corrente máxima permitida está circulando no circuito de campo do motor.

Se o motor estiver operando com sua tensão de terminal, potência e corrente de campo nominais, então ele estará funcionando na velocidade nominal, também conhecida como *velocidade de base*. O controle por resistência de campo pode controlar a velocidade do motor para velocidades acima da velocidade de base, mas não para velocidades abaixo da velocidade de base. Para conseguir uma velocidade menor do que a velocidade de base controlando o circuito de campo, seria necessário uma corrente de campo excessiva, possivelmente queimando os enrolamentos de campo.

No controle por tensão de armadura, quanto menor for a tensão de armadura em um motor CC de excitação independente, mais lentamente ele irá girar e, por outro lado, quanto maior for a tensão de armadura, mais rapidamente ele irá girar. Como um aumento na tensão de armadura causa um aumento de velocidade, sempre há uma velocidade máxima que pode ser alcançada com o controle por tensão de armadura. Essa velocidade máxima ocorre quando a tensão de armadura do motor atinge seu valor máximo permitido.

Se o motor estiver operando com sua tensão, corrente de campo e potência nominais, então ele estará girando na velocidade de base. O controle por tensão de armadura pode controlar a velocidade do motor para velocidades inferiores à velocidade de base, mas não para velocidades superiores à velocidade de base. Para obter uma velocidade maior que a velocidade de base usando o controle por tensão de armadura, seria necessário uma tensão de armadura excessiva, possivelmente danificando o circuito de armadura.

Obviamente, essas duas técnicas de controle de velocidade são complementares. O controle por tensão de armadura funciona bem com velocidades inferiores à velocidade de base e o controle por resistência de campo ou de corrente de campo funciona bem para velocidades superiores à velocidade de base. Combinando ambas as técnicas de controle de velocidade no mesmo motor, é possível obter um intervalo de variação de velocidade de até 40 para 1 ou mais. Os motores em derivação e de excitação independente apresentam características excelentes de controle de velocidade.

Nesses dois tipos de controle de velocidade, há uma diferença significativa nos limites de conjugado e potência da máquina. O fator limitante em ambos os casos é o

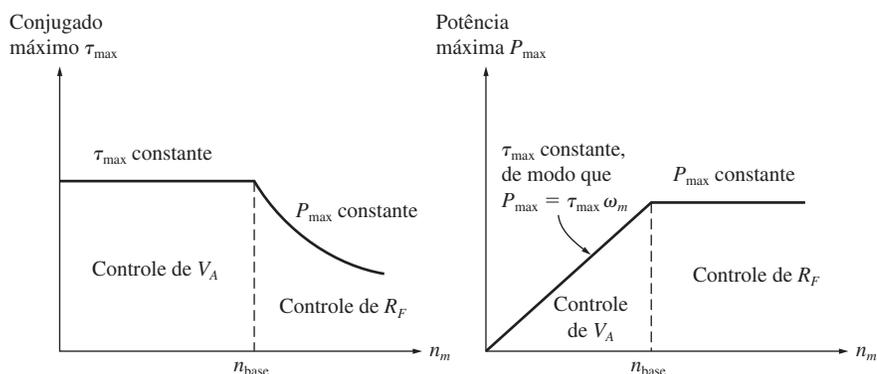


FIGURA 8-16

Limites de potência e conjugado em função da velocidade para um motor CC em derivação, controlado por tensão de armadura e resistência de campo.

aquecimento dos condutores da armadura, o que coloca um limite superior no valor da corrente I_A de armadura.

No controle por tensão de armadura, *o fluxo no motor é constante*, de modo que o conjugado máximo no motor é

$$\tau_{\max} = K\phi I_{A, \max} \quad (8-14)$$

Esse conjugado máximo é constante, independentemente da velocidade de rotação do motor. Como a potência fornecida pelo motor é dada por $P = \tau\omega$, a potência máxima do motor para qualquer velocidade controlada por tensão de armadura é

$$P_{\max} = \tau_{\max}\omega_m \quad (8-15)$$

Portanto, no controle por tensão de armadura, *a potência máxima fornecida pelo motor é diretamente proporcional à sua velocidade de operação.*

Por outro lado, quando é usado o controle por resistência de campo, o fluxo não se altera. Nesse caso, o aumento de velocidade é causado por uma diminuição do fluxo da máquina. Para que o limite de corrente de armadura não seja excedido, o limite de conjugado induzido deve diminuir à medida que a velocidade do motor aumenta. Como a potência fornecida pelo motor é dada por $P = \tau\omega$ e o limite de conjugado diminui quando a velocidade do motor aumenta, então *a potência máxima fornecida por um motor CC controlado por corrente de campo é constante*, ao passo que *o conjugado máximo varia conforme o inverso da velocidade do motor.*

Para uma operação segura em função da velocidade, essas limitações de potência e conjugado do motor CC em derivação estão mostradas na Figura 8-16.

Os exemplos seguintes ilustram como encontrar a nova velocidade de um motor CC se ela for variada usando os métodos de controle por resistência de campo e tensão de armadura.

EXEMPLO 8-3 A Figura 8-17a mostra um motor CC em derivação de 100 HP, 250 V e 1200 rpm, com uma resistência de armadura de $0,03 \Omega$ e uma resistência de campo de $41,67 \Omega$. O motor tem enrolamentos de compensação, de modo que a reação de armadura pode ser ignorada. Pode-se assumir que as perdas mecânicas e no núcleo são desprezíveis para os propósitos

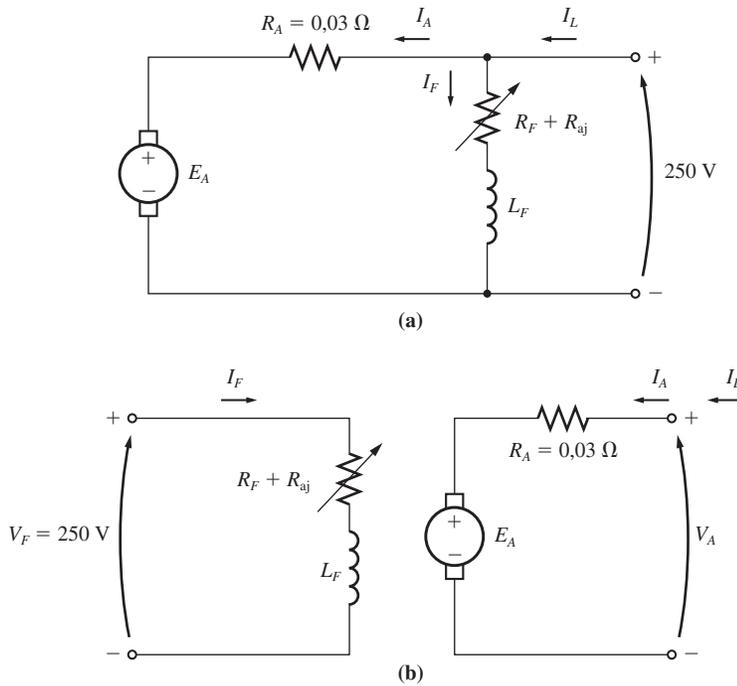


FIGURA 8-17
 (a) O motor em derivação do Exemplo 8-3. (b) O motor CC de excitação independente do Exemplo 8-4.

deste problema. Assume-se que o motor está acionando uma carga com uma corrente de linha de 126 A e uma velocidade inicial de 1103 rpm. Para simplificar o problema, assuma que a corrente de armadura do motor permanece constante.

- (a) Se a curva de magnetização da máquina for a mostrada na Figura 8-9, qual será a velocidade do motor se a resistência de campo for elevada para 50 Ω?
- (b) Calcule e plote a velocidade desse motor em função da resistência de campo R_F , assumindo uma carga de corrente constante.

Solução

- (a) O motor tem uma corrente de linha inicial de 126 A, de modo que a corrente de armadura inicial é

$$I_{A1} = I_{L1} - I_{F1} = 126 \text{ A} - \frac{250 \text{ V}}{41,67 \Omega} = 120 \text{ A}$$

Portanto, a tensão interna gerada é

$$\begin{aligned} E_{A1} &= V_T - I_{A1}R_A = 250 \text{ V} - (120 \text{ A})(0,03 \Omega) \\ &= 246,4 \text{ V} \end{aligned}$$

Depois de aumentar a resistência de campo para 50 Ω, a corrente de campo torna-se

$$I_{F2} = \frac{V_T}{R_F} = \frac{250 \text{ V}}{50 \Omega} = 5 \text{ A}$$

A razão entre a tensão interna gerada em uma velocidade e tensão interna gerada em outra velocidade é dada pela razão da Equação (7-41) nas duas velocidades:

$$\frac{E_{A2}}{E_{A1}} = \frac{K'\phi_2 n_{m2}}{K'\phi_1 n_{m1}} \quad (8-16)$$

Assumindo que a corrente de armadura é constante, $E_{A1} = E_{A2}$, temos que essa equação se reduz a

$$1 = \frac{\phi_2 n_{m2}}{\phi_1 n_{m1}}$$

ou

$$n_{m2} = \frac{\phi_1}{\phi_2} n_{m1} \quad (8-17)$$

Uma curva de magnetização é um gráfico de E_A versus I_F para uma dada velocidade. Como os valores de E_A na curva são diretamente proporcionais ao fluxo, a razão entre as tensões internas geradas, lidas da curva, é igual à razão entre os fluxos da máquina. Para $I_F = 5$ A, temos $E_{A0} = 250$ V, ao passo que para $I_F = 6$ A, temos $E_{A0} = 268$ V. Portanto, a razão entre os fluxos é dada por

$$\frac{\phi_1}{\phi_2} = \frac{268 \text{ V}}{250 \text{ V}} = 1,076$$

e a nova velocidade do motor será

$$n_{m2} = \frac{\phi_1}{\phi_2} n_{m1} = (1,076)(1103 \text{ rpm}) = 1187 \text{ rpm}$$

(b) A seguir, temos um programa (*M-file*) de MATLAB que calcula a velocidade do motor em função de R_f :

```
% M-file: rf_speed_control.m (Controle de velocidade por resistência
% de campo)
% Este programa (M-file) cria um gráfico da velocidade de um
% motor CC em derivação, como função da resistência de campo,
% assumindo uma corrente de armadura constante (Exemplo 8-3).

% Obtenha a curva de magnetização. Este arquivo contém as três
% variáveis if_value (valor da corrente de campo), ea_value e n_0.
load fig8_9.mat

% Primeiro, inicialize os valores necessários a este programa.
v_t = 250; % Tensão de terminal (em V)
r_f = 40:1:70; % Resistência de campo (em ohms)
r_a = 0.03; % Resistência de armadura (em ohms)
i_a = 120; % Correntes de armadura (em A)

% A abordagem adotada aqui consiste em calcular o valor de e_a0 para
% a corrente de campo de referência e então calcular os valores de
% e_a0 para cada corrente de campo. A velocidade de referência é
% 1103 rpm, de modo que, conhecendo e_a0 e a velocidade de
% referência, poderemos calcular a velocidade para
% cada corrente de campo.

% Calcule a tensão interna gerada, para 1200 rpm e para a corrente
% de referência de campo de 5 A, fazendo uma interpolação na
% curva de magnetização do motor. A velocidade de referência
```

```

% correspondente a essa corrente de campo é 1103 rpm.
e_a0_ref = interp1(if_values,ea_values,5,'spline');
n_ref = 1103;

% Calcule a corrente de campo para cada valor de
% resistência de campo.
i_f = v_t./ r_f;

% Calcule e_a0 para cada corrente de campo interpolando a
% curva de magnetização do motor.
e_a0 = interp1(if_values,ea_values,i_f,'spline');

% Calcule a velocidade resultante a partir da Equação (8-17):
% n2 5 (phi1 / phi2) * n1 = (e_a0_1 / e_a0_2) * n1
n2 = (e_a0_ref./ e_a0) * n_ref;

% Plote a curva de velocidade versus resistência de campo, r_f.
plot(r_f,n2,'k-','LineWidth',2.0);
hold on;
xlabel('\bfResistência de Campo, \Omega');
ylabel('\bf\itn_{m} \rm\bf(rpm)');
title ('\bfVelocidade versus \itR_{F} \rm\bfpara um Motor CC em
Derivação');
axis([40 70 0 1400]);
grid on;
hold off;

```

O gráfico resultante está mostrado na Figura 8-18.

Para cargas reais, observe que não é uma boa opção supor que a corrente de armadura seja constante quando R_f varia. A corrente de armadura varia com a velocidade. A forma dessa variação depende do conjugado que está sendo exigido pelo tipo de carga acoplada ao motor. Essas diferenças fazem com que a curva de velocidade *versus* R_f seja ligeiramente diferente da mostrada na Figura 8-18, mas ela terá uma forma semelhante.

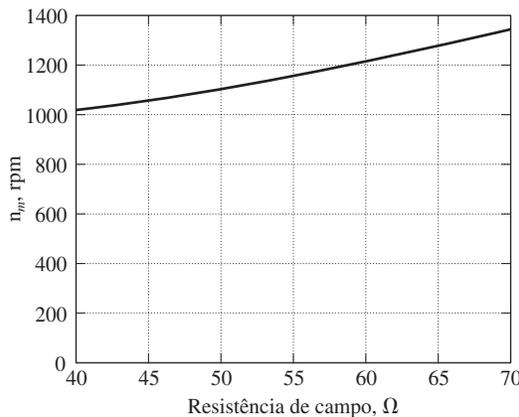


FIGURA 8-18

Gráfico da velocidade *versus* resistência de campo para o motor CC em derivação do Exemplo 8-3.

EXEMPLO 8-4 Agora, o motor do Exemplo 8-3 foi conectado na forma de excitação independente, como está mostrado na Figura 8-17b. Inicialmente, o motor opera com $V_A = 250$ V, $I_A = 120$ A e $n = 1103$ rpm e aciona uma carga de conjugado constante. Qual será a velocidade desse motor se a tensão V_A for reduzida para 200 V?

Solução

O motor tem uma corrente de linha inicial de 120 A e uma tensão de armadura V_A de 250 V, de modo que a tensão interna gerada E_A é

$$E_A = V_T - I_A R_A = 250 \text{ V} - (120 \text{ A})(0,03 \Omega) = 246,4 \text{ V}$$

Aplicando a Equação (8-16) e sabendo que o fluxo ϕ é constante, a velocidade do motor pode ser expressa como

$$\begin{aligned} \frac{E_{A2}}{E_{A1}} &= \frac{K' \phi_2 n_{m2}}{K' \phi_1 n_{m1}} & (8-16) \\ &= \frac{n_{m2}}{n_{m1}} \\ n_{m2} &= \frac{E_{A2}}{E_{A1}} n_{m1} \end{aligned}$$

Para encontrar E_{A2} , use a lei de Kirchhoff das tensões:

$$E_{A2} = V_T - I_{A2} R_A$$

Como o conjugado e o fluxo são constantes, I_A é constante. Isso leva a uma tensão de

$$E_{A2} = 200 \text{ V} - (120 \text{ A})(0,03 \Omega) = 196,4 \text{ V}$$

A velocidade final do motor é, portanto,

$$n_{m2} = \frac{E_{A2}}{E_{A1}} n_{m1} = \frac{196,4 \text{ V}}{246,4 \text{ V}} 1103 \text{ rpm} = 879 \text{ rpm}$$

O efeito de um circuito de campo aberto

A seção anterior deste capítulo continha uma discussão do controle de velocidade pela variação da resistência de campo de um motor CC em derivação. Quando a resistência de campo aumentava, a velocidade do motor aumentava também. Que aconteceria se esse efeito fosse levado ao extremo, se a resistência de campo *realmente* aumentasse muito? Que aconteceria se o circuito de campo realmente abrisse enquanto o motor estivesse operando? Da discussão anterior, o fluxo na máquina diminuiria repentinamente até chegar a ϕ_{res} e $E_A (= K\phi\omega_m)$ diminuiria junto. Isso causaria um grande aumento da corrente de armadura e o conjugado induzido resultante seria bem mais elevado do que o conjugado de carga no motor. Portanto, a velocidade do motor começaria a aumentar e continuaria subindo.

Os resultados de um circuito aberto podem ser bem espetaculares. Certa vez, quando o autor era um estudante de graduação “em engenharia elétrica na Louisiana State University”, seu grupo de laboratório cometeu um erro desse tipo. O grupo estava trabalhando com um pequeno conjunto de motor e gerador, que era acionado por um motor CC em derivação de 3 HP. As conexões tinham sido realizadas e o motor estava pronto para o início da experiência, mas havia apenas *um* pequeno erro – quando o circuito de campo foi conectado, incluiu-se um fusível de 0,3 A no lugar de um de 3 A, que seria o correto de usar.

Quando foi dada a partida no motor, ele funcionou normalmente por cerca de 3 s e então subitamente houve um clarão no fusível. Imediatamente, a velocidade do motor foi às alturas. Após alguns segundos, alguém desligou o disjuntor principal do circuito. Nesse momento, o tacômetro acoplado ao motor tinha chegado a 4000 rpm. A velocidade nominal do motor era de apenas 800 rpm.

É desnecessário dizer que aquela experiência assustou muito todos os presentes e ensinou-os a ser *muito* cuidadosos em relação à proteção do circuito de campo. Nos circuitos de partida e de proteção de um motor CC, inclui-se normalmente um *relé de perda de campo* , que é usado para desligar o motor da linha, no caso de se perder a corrente de campo.

Se os efeitos de reação de armadura forem muito intensos, um efeito similar poderá ocorrer em motores comuns CC em derivação que operam com campos de baixa intensidade. Se isso ocorrer, então um aumento de carga poderá enfraquecer seu fluxo o suficiente para fazer com que a velocidade do motor aumente. Entretanto, a maioria das cargas apresenta curvas de conjugado *versus* velocidade cujo conjugado *aumenta* com a velocidade, de modo que o aumento de velocidade aumenta a carga, o que aumenta sua reação de armadura, voltando a enfraquecer o seu fluxo. O fluxo enfraquecido causa um novo aumento de velocidade, o que causa um novo aumento de carga, etc., até que a velocidade do motor dispara. Essa condição é conhecida como *velocidade em disparada* .

Nos motores que operam com mudanças de carga e ciclos de trabalho muito severos, esse problema de enfraquecimento de fluxo pode ser resolvido pela instalação de enrolamentos de compensação. Infelizmente, esses enrolamentos são caros demais para serem usados em motores comuns. A solução para o problema do motor com velocidade em disparada, que é usada em motores de baixo custo e motores sujeitos a ciclos de trabalho mais leves, consiste em incluir uma ou duas espiras de enrolamento composto cumulativo aos polos do motor. Quando a carga cresce, a força magnetomotriz dos enrolamentos em série aumenta, o que contrabalança a força magnetomotriz desmagnetizante da reação de armadura. Um motor CC em derivação, equipado com apenas poucas espiras como esse, é denominado motor *em derivação estabilizado* .

8.5 O MOTOR CC DE ÍMÃ PERMANENTE

Um *motor CC de ímã permanente* (CCIP) é um motor CC cujos polos são feitos de ímãs permanentes. Esses motores oferecem diversos benefícios em comparação com os motores CC em derivação usados em algumas aplicações. Como não precisam de um circuito de campo externo, eles não têm as perdas que ocorrem no cobre do circuito de campo dos motores CC em derivação. Como não há necessidade de enrolamento de campo, eles podem ser menores do que os correspondentes motores CC em derivação. Os motores CCIP podem ser encontrados comumente em tamanhos que chegam até 10 HP aproximadamente e, nos últimos anos, alguns motores foram construídos alcançando 100 HP. Contudo, eles são especialmente comuns em tamanhos menores, fracionários ou subfracionários, para os quais a inclusão de um circuito separado de campo não se justifica devido ao custo e o espaço necessário.

Em geral, os motores CCIP são mais baratos, de tamanho menor, mais simples e mais eficientes do que os motores CC correspondentes, com campos eletromagnéticos separados. Isso os torna uma boa escolha em muitas aplicações de motores CC. Basicamente, as armaduras dos motores CCIP são idênticas às armaduras dos mo-

tores com circuitos separados de campo, o que também torna seus custos similares. Por outro lado, a eliminação dos eletroímãs separados no estator reduz o tamanho do estator, o custo do estator e as perdas nos circuitos de campo.

Os motores CCIP também têm desvantagens. Os ímãs permanentes não conseguem produzir uma densidade de fluxo tão elevada quanto a de um campo em derivação de alimentação externa. Desse modo, um motor CCIP terá um conjugado induzido τ_{ind} menor por ampère de corrente de armadura I_A do que um motor CC em derivação de mesmo tamanho e construção. Além disso, os motores CCIP correm o risco de desmagnetização. Como foi mencionado no Capítulo 7, a corrente de armadura I_A em uma máquina CC produz um campo magnético de armadura. A força magnetomotriz da armadura é subtraída da força magnetomotriz dos polos debaixo de algumas partes das faces polares e é adicionada à força magnetomotriz dos polos debaixo de outras partes das faces polares (veja as Figuras 8-23 e 8-25), reduzindo o fluxo líquido total na máquina. Esse é o efeito da *reação de armadura*. Em uma máquina CCIP, o fluxo dos polos consiste apenas em fluxo residual presente nos ímãs permanentes. Se a corrente de armadura tornar-se muito elevada, então haverá algum risco de que a força magnetomotriz da armadura possa desmagnetizar os polos, reduzindo permanentemente e orientando de outra forma o fluxo residual presente neles. A desmagnetização também pode ser causada pelo aquecimento excessivo devido a um choque (queda do motor) ou a períodos prolongados de sobrecarga. Além disso, os materiais CCIP são mais fracos fisicamente do que a maioria dos aços normais. Desse modo, os estatores construídos com esses materiais podem ter limites devido às exigências físicas do conjugado de motor.

A Figura 8-19a mostra uma curva de magnetização para um material ferromagnético típico. É um gráfico da densidade de fluxo \mathbf{B} versus a intensidade de campo magnético \mathbf{H} (ou, de forma equivalente, um gráfico do fluxo ϕ versus a força magnetomotriz \mathcal{F}). Quando uma força magnetomotriz elevada externa é aplicada a esse material e removida em seguida, um fluxo residual \mathbf{B}_{res} permanecerá no material. Para forçar o fluxo residual a zero, é necessário aplicar uma intensidade de campo magnético coercitivo \mathbf{H}_C com polaridade oposta à polaridade da intensidade de campo magnético \mathbf{H} que originalmente produziu o campo magnético. Para aplicações normais em máquinas, como rotores e estatores, deve-se escolher um material ferromagnético que tenha as menores \mathbf{B}_{res} e \mathbf{H}_C possíveis, porque tal material terá baixas perdas por histerese.

Por outro lado, um bom material para os polos de um motor CCIP deverá ter a maior densidade de fluxo residual \mathbf{B}_{res} possível e, ao mesmo tempo, deverá ter a maior intensidade de campo magnético coercitivo \mathbf{H}_C possível. A curva de magnetização desse material está mostrada na Figura 8-19b. A \mathbf{B}_{res} elevada produz um grande fluxo na máquina, ao passo que a \mathbf{H}_C elevada significa que seria necessário uma corrente muita elevada para desmagnetizar os polos.

Nos últimos 40 anos, foram desenvolvidos diversos materiais magnéticos que apresentam características desejáveis para a fabricação de ímãs permanentes. Os tipos principais desses materiais são os materiais magnéticos cerâmicos (ferrite) e os materiais magnéticos de terras raras. A Figura 8-19c mostra o segundo quadrante das curvas de magnetização de alguns ímãs cerâmicos e de terras raras típicos, comparadas com a curva de magnetização de uma liga ferromagnética convencional (Alnico 5). É óbvio da comparação que os melhores ímãs de terras raras podem produzir o mesmo fluxo residual que as melhores ligas ferromagnéticas convencionais e, ao mesmo tempo, são largamente imunes aos problemas de desmagnetização devido à reação de armadura.

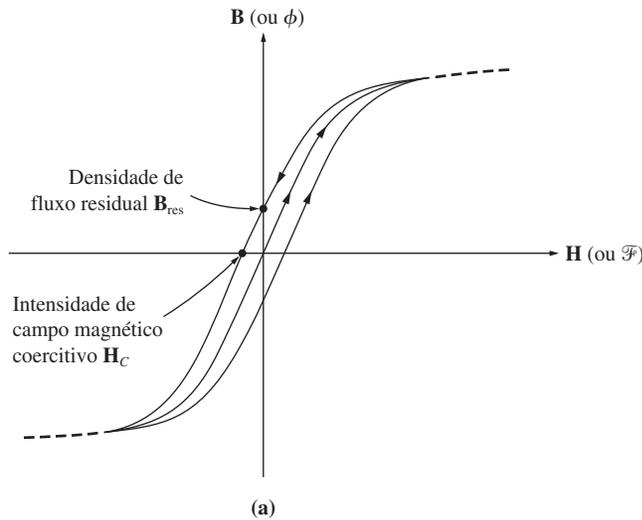


FIGURA 8-19

(a) A curva de magnetização de um típico material ferromagnético. Observe o laço de histerese. Depois de aplicar e remover do núcleo uma intensidade de campo magnético H elevada, uma densidade de fluxo residual B_{res} permanecerá no núcleo. Esse fluxo poderá retornar a zero se uma intensidade de campo magnético coercitivo H_C de polaridade oposta for aplicada ao núcleo. Nesse caso, um valor relativamente pequeno será suficiente para desmagnetizar o núcleo.

Um motor CC de ímã permanente é basicamente a mesma máquina que um motor CC em derivação, exceto pelo fato de que *o fluxo de um motor CCIP é fixo*. Portanto, não é possível controlar a velocidade de um motor CCIP variando a corrente de campo ou o fluxo. Para um motor CCIP, os únicos métodos de controle de velocidade disponíveis são o controle por tensão de armadura e o controle por resistência de armadura.

As técnicas de análise de um motor CCIP são basicamente as mesmas de um motor CC em derivação, com a corrente de campo mantida constante.

Para mais informação a respeito dos motores CCIP, veja as Referências 4 e 10.

8.6 O MOTOR CC SÉRIE

Um motor CC série é um motor CC cujos enrolamentos de campo consistem em relativamente poucas espiras conectadas em série com o circuito de armadura. O circuito equivalente de um motor CC série está mostrado na Figura 8-20. Em um motor série, a corrente de armadura, a corrente de campo e a corrente de linha são todas a mesma. A equação da lei de Kirchhoff para as tensões desse motor é

$$V_T = E_A + I_A(R_A + R_S) \tag{8-18}$$

Conjugado induzido em um motor CC série

A característica de terminal de um motor CC série é muito diferente da característica do motor em derivação estudado anteriormente. O comportamento básico de um motor CC série deve-se ao fato de que *o fluxo é diretamente proporcional à corrente de armadura*, no mínimo até que a saturação seja alcançada. À medida que aumenta

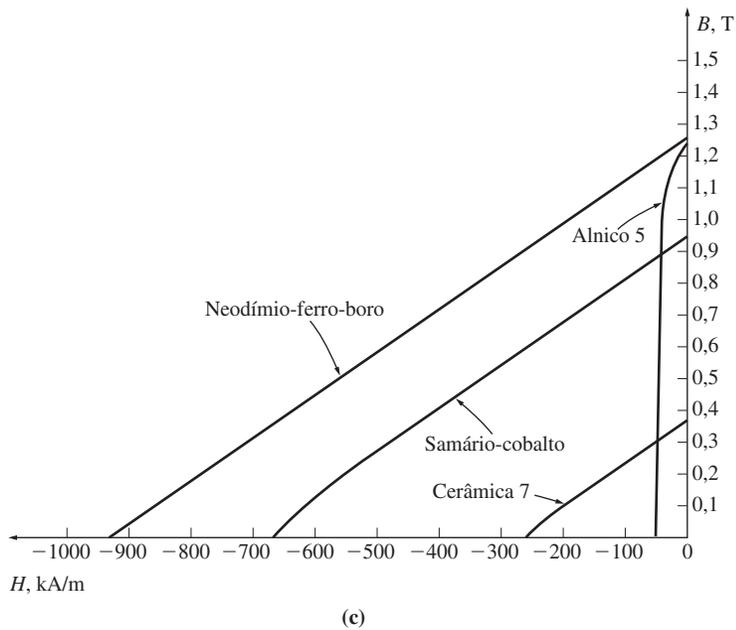
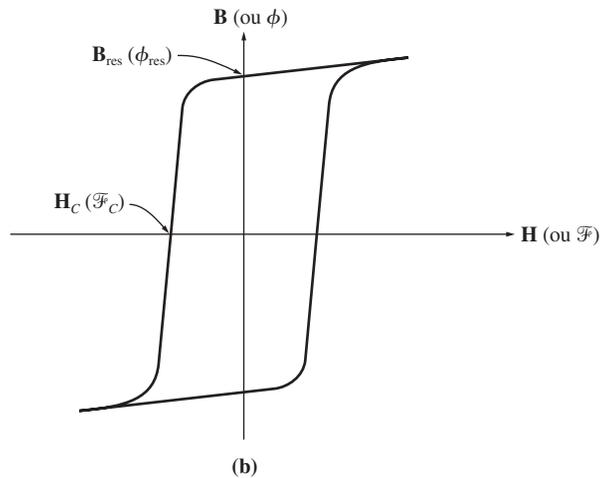


FIGURA 8-19 (conclusão)

(b) A curva de magnetização de um material ferromagnético adequado à fabricação de ímãs permanentes. Observe a alta densidade de fluxo residual B_{res} e a intensidade relativamente elevada de campo magnético coercitivo H_C . (c) O segundo quadrante das curvas de magnetização de alguns materiais magnéticos típicos. Observe que os ímãs de terras raras combinam um fluxo residual elevado com uma elevada intensidade de campo magnético coercitivo.

a carga do motor, seu fluxo também aumenta. Como foi visto antes, um aumento de fluxo no motor causa uma diminuição de sua velocidade. O resultado é que um motor série tem uma característica de conjugado *versus* velocidade de declive muito acentuado.

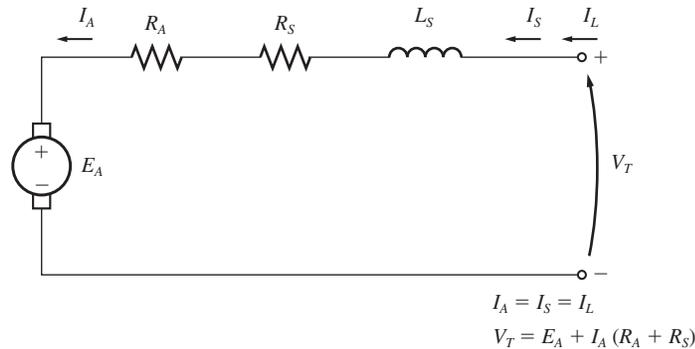


FIGURA 8-20
O circuito equivalente de um motor CC série.

O conjugado induzido dessa máquina é dado pela Equação (7-49):

$$\tau_{\text{ind}} = K\phi I_A \tag{7-49}$$

O fluxo dessa máquina é diretamente proporcional à sua corrente de armadura (no mínimo até que o metal sature). Portanto, o fluxo da máquina pode ser dado por

$$\phi = cI_A \tag{8-19}$$

em que c é uma constante de proporcionalidade. Assim, o conjugado induzido dessa máquina é dado por

$$\tau_{\text{ind}} = K\phi I_A = KcI_A^2 \tag{8-20}$$

Em outras palavras, o conjugado do motor é proporcional ao quadrado de sua corrente de armadura. Como resultado, é fácil ver que um motor série fornece mais conjugado por ampère do que qualquer outro motor CC. Portanto, ele é usado em aplicações que requerem conjugados muito elevados. Exemplos dessas aplicações são os motores de arranque dos carros, os motores de elevador e os motores de tração das locomotivas.

A característica de terminal de um motor CC série

Para determinar a característica de terminal de um motor CC série, uma análise será feita supondo uma curva de magnetização linear e então os efeitos de saturação serão examinados por meio de uma análise gráfica.

Supondo uma curva de magnetização linear, o fluxo do motor será dado pela Equação (8-19):

$$\phi = cI_A \tag{8-19}$$

Essa equação será usada para obter a curva da característica de conjugado *versus* velocidade do motor série.

O desenvolvimento dessa característica de conjugado *versus* velocidade começa com a lei de Kirchhoff das tensões:

$$V_T = E_A + I_A(R_A + R_S) \tag{8-18}$$

Da Equação (8-20), podemos expressar a corrente de armadura como

$$I_A = \sqrt{\frac{\tau_{\text{ind}}}{Kc}}$$

Temos também que $E_A = K\phi\omega_m$. Substituindo essas expressões na Equação (8-18), obtemos

$$V_T = K\phi\omega_m + \sqrt{\frac{\tau_{\text{ind}}}{Kc}}(R_A + R_S) \quad (8-21)$$

Se o fluxo for eliminado dessa expressão, poderemos relacionar diretamente o conjugado de um motor com sua velocidade. Para eliminar o fluxo da expressão, observe que

$$I_A = \frac{\phi}{c}$$

e a equação do conjugado induzido poderá ser escrita como

$$\tau_{\text{ind}} = \frac{K}{c} \phi^2$$

Portanto, o fluxo no motor pode ser expresso como

$$\phi = \sqrt{\frac{c}{K}} \sqrt{\tau_{\text{ind}}} \quad (8-22)$$

Substituindo a Equação (8-22) na Equação (8-21) e isolando a velocidade, obtemos

$$\begin{aligned} V_T &= K\sqrt{\frac{c}{K}} \sqrt{\tau_{\text{ind}}} \omega_m + \sqrt{\frac{\tau_{\text{ind}}}{Kc}}(R_A + R_S) \\ \sqrt{Kc} \sqrt{\tau_{\text{ind}}} \omega_m &= V_T - \frac{R_A + R_S}{\sqrt{Kc}} \sqrt{\tau_{\text{ind}}} \\ \omega_m &= \frac{V_T}{\sqrt{Kc} \sqrt{\tau_{\text{ind}}}} - \frac{R_A + R_S}{Kc} \end{aligned}$$

A relação resultante de conjugado *versus* velocidade é

$$\omega_m = \frac{V_T}{\sqrt{Kc}} \frac{1}{\sqrt{\tau_{\text{ind}}}} - \frac{R_A + R_S}{Kc} \quad (8-23)$$

Observe que, para um motor série não saturado, a velocidade do motor varia com o inverso da raiz quadrada do conjugado. Trata-se de uma relação bem incomum! Essa característica de conjugado *versus* velocidade ideal está plotada na Figura 8-21.

Examinando essa equação, pode-se ver imediatamente uma das desvantagens dos motores série. Quando o conjugado desse motor vai a zero, sua velocidade vai a infinito. Na prática, o conjugado nunca pode ser inteiramente zero devido às perdas mecânicas, no núcleo e suplementares. Entretanto, se nenhuma outra carga mecânica for acoplada ao motor, ele poderá girar suficientemente rápido para se danificar seriamente. *Nunca* deixe um motor CC série completamente sem carga e nunca acople a carga mecânica por meio de uma correia ou outro mecanismo que possa se romper. Se isso acontecesse e o motor ficasse sem carga enquanto estivesse em funcionamento, os resultados poderiam muito graves.

A análise não linear de um motor CC série, com efeitos de saturação magnética, mas desprezando a reação de armadura, está ilustrada no Exemplo 8-5.

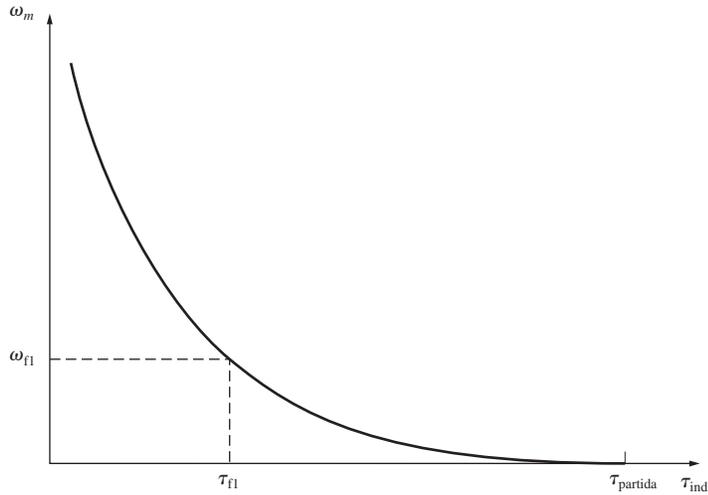


FIGURA 8-21

A característica de conjugado *versus* velocidade de um motor CC série.

EXEMPLO 8-5 A Figura 8-20 mostra um motor CC série de 250 V com enrolamentos de compensação e uma resistência em série total $R_A + R_S$ de $0,08 \Omega$. O campo em série consiste em 25 espira por polo, com a curva de magnetização mostrada na Figura 8-22.

- (a) Encontre a velocidade e o conjugado induzido desse motor quando sua corrente de armadura é 50 A.
- (b) Calcule e plote a característica de conjugado *versus* velocidade desse motor.

Solução

- (a) Para analisar o comportamento de um motor série com saturação, escolha pontos sobre a curva de operação e encontre o conjugado e a velocidade para cada ponto. Observe que a curva de magnetização é dada em unidades de força magnetomotriz (ampères-espiras, $A \cdot e$) *versus* E_A para a velocidade de 1200 rpm, de modo que os valores calculados de E_A devem ser comparados com os valores equivalentes em 1200 rpm para determinar a velocidade real do motor.

Para $I_A = 50 \text{ A}$, temos

$$E_A = V_T = I_A(R_A + R_S) = 250 \text{ V} - (50\text{A})(0,08 \Omega) = 246 \text{ V}$$

Como $I_A = I_F = 50 \text{ A}$, a força magnetomotriz é

$$\mathcal{F} = NI = (25 \text{ espiras})(50 \text{ A}) = 1250 \text{ A} \cdot e$$

Da curva de magnetização, para $\mathcal{F} = 1250 \text{ A} \cdot e$, temos $E_{A0} = 80 \text{ V}$. Para obter a velocidade correta do motor, lembre-se, da Equação (8-13), de que

$$\begin{aligned} n_m &= \frac{E_A}{E_{A0}} n_0 \\ &= \frac{246 \text{ V}}{80 \text{ V}} 1200 \text{ rpm} = 3690 \text{ rpm} \end{aligned}$$

Para encontrar o conjugado induzido fornecido pelo motor nessa velocidade, lembre-se de que $P_{\text{conv}} = E_A I_A = \tau_{\text{ind}} \omega_m$. Portanto,

$$\begin{aligned}\tau_{\text{ind}} &= \frac{E_A I_A}{\omega_m} \\ &= \frac{(246 \text{ V})(50 \text{ A})}{(3690 \text{ rotações/min})(1 \text{ min}/60 \text{ s})(2\pi \text{ rad/rotação})} = 31,8 \text{ N} \cdot \text{m}\end{aligned}$$

- (b) Para calcular a característica completa de conjugado *versus* velocidade, devemos repetir os passos anteriores de (a) para muitos valores diferentes da corrente de armadura. Um programa (*M-file*) de MATLAB, que calcula a característica de conjugado *versus* velocidade do motor CC série, está mostrado a seguir. Observe que a curva de magnetização usada por esse programa é dada em termos da força magnetomotriz em vez da corrente efetiva de corrente de campo.

```
% M-file: shunt_ts_curve.m
% M-file para plotar a curva de conjugado versus velocidade do
% motor CC série com reação de armadura do
% Exemplo 8-5.

% Obtenha a curva de magnetização. Este arquivo contém as
% três variáveis mmf_values, ea_value e n_0.
load fig8_22.mat
```

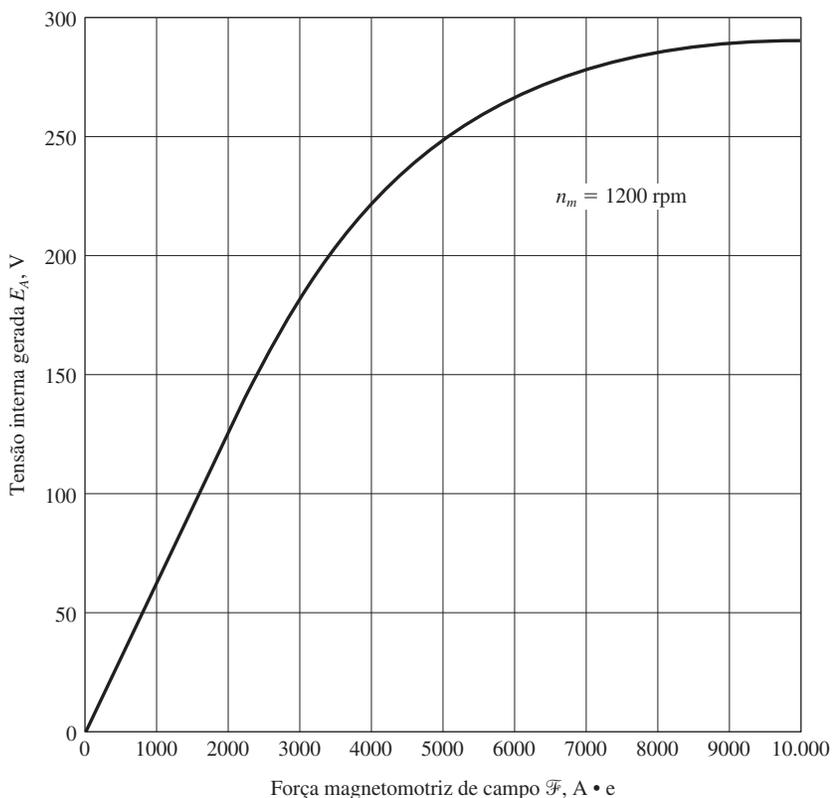


FIGURA 8-22

A curva de magnetização do motor do Exemplo 8-5. Essa curva foi obtida para a velocidade $n_m = 1200 \text{ rpm}$.

```

% Primeiro, inicialize os valores necessários a este programa.
v_t = 250;           % Tensão de terminal (em V)
r_a = 0.08;         % Resistência de armadura + campo (em ohms)
i_a = 10:10:300;    % Correntes de armadura (linha) (em A)
n_s = 25;           % Número de espiras em série no campo

% Calcule a FMM para cada carga
f = n_s * i_a;

% Calcule a tensão interna gerada e_a.
e_a = v_t - i_a * r_a;

% Calcule a tensão interna gerada resultante para
% 1200 rpm, interpolando a curva de magnetização do
% motor.
e_a0 = interp1(mmf_values,ea_values,f,'spline');

% Calcule a velocidade do motor usando a Equação (8-13).
n = (e_a./ e_a0) * n_0;

% Calcule o conjugado induzido correspondente a cada
% velocidade a partir das Equações (7-55) e (7-56).
t_ind = e_a.* i_a./ (n * 2 * pi / 60);

% Plote a curva de conjugado versus velocidade
plot(t_ind,n,'Color','k','LineWidth',2.0);
hold on;
xlabel('\bf\tau_{ind} (N.m)');
ylabel('\bf\itn_{m} \rm\bf (rpm)');
title('\bfCaracterística de Conjugado versus Velocidade de um Motor CC Série');
axis([ 0 700 0 5000]);
grid on;
hold off;

```

A característica de conjugado *versus* velocidade resultante do motor está mostrada na Figura 8-23. Observe a sobrevelocidade excessiva para conjugados muito baixos.

Controle de velocidade de motores CC série

Diferentemente do motor CC em derivação, há apenas um modo eficiente de alterar a velocidade de um motor CC série. Esse método consiste em variar a tensão de terminal do motor. Se a tensão de terminal for incrementada, o primeiro termo da Equação (8-23) aumentará, resultando em uma *velocidade mais elevada para qualquer conjugado dado*.

A velocidade dos motores CC série também pode ser controlada pela inserção no circuito do motor de um resistor em série. Entretanto, essa técnica desperdiça muita potência e é usada apenas por períodos intermitentes durante a partida de alguns motores.

Até os últimos 40 anos, aproximadamente, não havia maneira conveniente de se variar V_T , de modo que o único método de controle de velocidade disponível era o método de controle por resistência em série, que desperdiça muita energia. Atualmente, isso mudou com a introdução dos circuitos de controle de estado sólido.

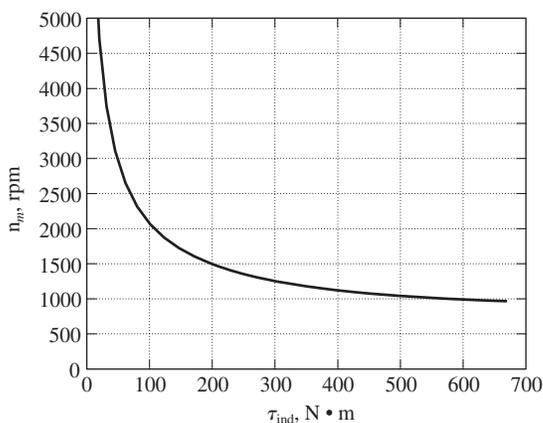


FIGURA 8-23

A característica de conjugado *versus* velocidade do motor CC série do Exemplo 8-5.

8.7 O MOTOR CC COMPOSTO

Um motor CC composto é um motor que tem *campos em derivação e em série*. Esse motor está mostrado na Figura 8-24. Os pontos ou marcas que aparecem nas bobinas dos dois campos têm o mesmo significado que os pontos ou as marcas em um transformador: *uma corrente que entra no terminal com marca produz uma força magnetomotriz positiva*. Se a corrente entrar nos terminais com marcas de ambas as bobinas de campo, as forças magnetomotrizes resultantes combinam-se, produzindo uma força magnetomotriz total maior. Essa situação é conhecida como *composição cumulativa* ou *aditiva*. Se a corrente entrar no terminal com marca de uma bobina de campo e sair pelo terminal com marca da outra bobina de campo, as forças magnetomotrizes resultantes subtraem-se. Na Figura 8-24, as marcas circulares correspondem à composição cumulativa do motor e as marcas quadradas correspondem à composição diferencial.

A equação da lei de Kirchhoff das tensões para um motor CC composto é

$$V_T = E_A + I_A(R_A + R_S) \quad (8-24)$$

As relações entre as correntes de um motor composto são dadas por

$$I_A = I_L - I_F \quad (8-25)$$

$$I_F = \frac{V_T}{R_F} \quad (8-26)$$

No motor composto, a força magnetomotriz líquida e a corrente efetiva do campo em derivação são dadas por

$$\mathcal{F}_{\text{liq}} = \mathcal{F}_F \pm \mathcal{F}_{SE} - \mathcal{F}_{RA} \quad (8-27)$$

e

$$I_F^* = I_F \pm \frac{N_{SE}}{N_F} I_A - \frac{\mathcal{F}_{RA}}{N_F} \quad (8-28)$$

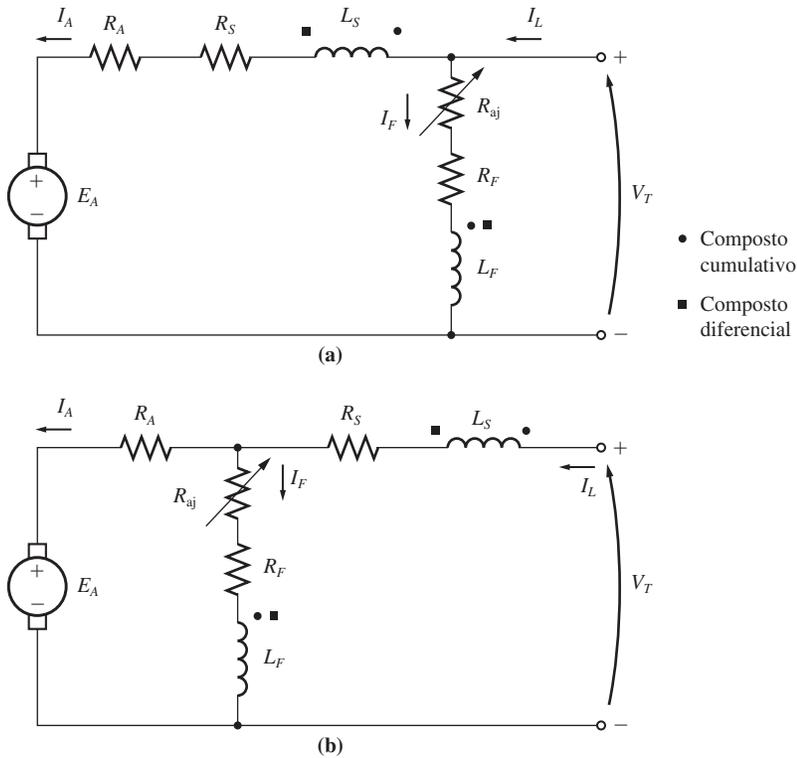


FIGURA 8-24
 O circuito equivalente de motores CC compostos: (a) ligação em derivação longa; (b) ligação em derivação curta.

em que o sinal positivo nas equações está associado a um motor CC composto cumulativo e o sinal negativo está associado ao motor CC composto diferencial.

A característica de conjugado x velocidade de um motor CC composto cumulativo

No motor CC composto cumulativo (ou aditivo), há uma componente de fluxo que é constante e outra que é proporcional à sua corrente de armadura (e portanto à sua carga). Dessa forma, o motor composto cumulativo tem um conjugado de partida mais elevado do que um motor em derivação (cujo fluxo é constante), mas um conjugado de partida mais baixo do que o de um motor série (cujo fluxo inteiro é proporcional à corrente de armadura).

De certa forma, o motor CC composto cumulativo combina as melhores características de ambos os motores em derivação e série. Como em um motor série, ele apresenta um conjugado extra para a partida e, como um motor em derivação, a velocidade não dispara quando ele está sem carga.

Com cargas leves, o campo em série tem um efeito muito pequeno, o que leva o motor a comportar-se aproximadamente como um motor CC em derivação. Quando a carga torna-se muito grande, o fluxo do enrolamento em série torna-se bem impor-

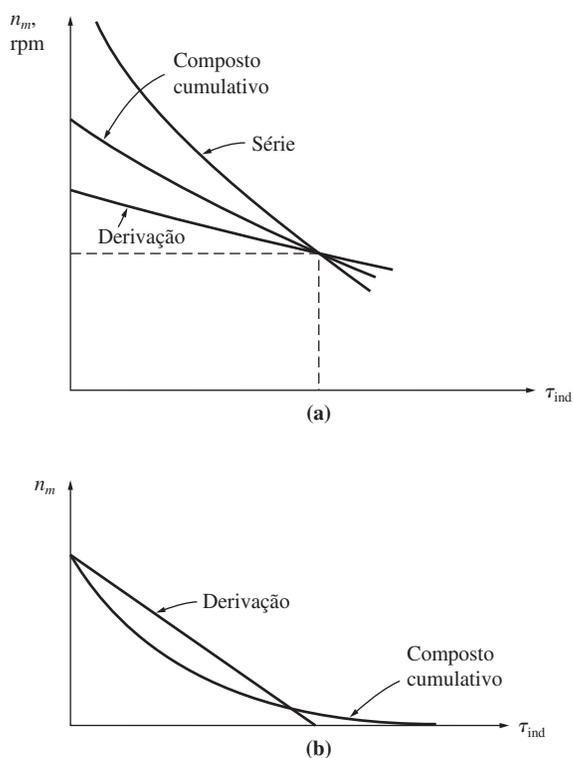


FIGURA 8-25

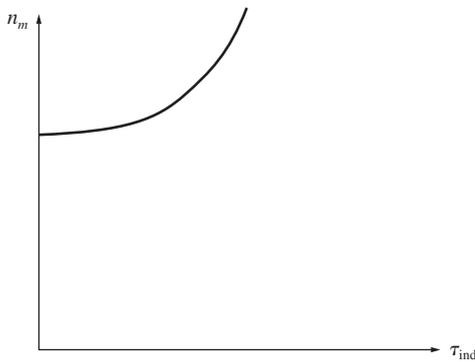
(a) A característica de conjugado *versus* velocidade de um motor CC composto cumulativo comparada com a de motores série e em derivação, com a mesma carga plena nominal. (b) A característica de conjugado *versus* velocidade de um motor CC composto cumulativo comparada com a de um motor em derivação, com a mesma velocidade a vazio.

tante e a característica de conjugado *versus* velocidade começa a se tornar semelhante à curva característica de um motor série. Uma comparação das características de conjugado *versus* velocidades de cada um desses tipos de máquinas está mostrada na Figura 8-25.

Para determinar a curva característica de um motor CC composto cumulativo por análise não linear, o método é similar ao dos motores em derivação e série vistos anteriormente. Essa análise será ilustrada em um exemplo mais adiante.

A característica de conjugado \times velocidade de um motor CC composto diferencial

Em um motor CC composto diferencial, a força magnetomotriz em derivação e a força magnetomotriz em série subtraem-se entre si. Isso significa que, quando a carga no motor aumenta, I_A aumenta e o fluxo no motor diminui. Entretanto, quando o fluxo diminui, a velocidade do motor eleva-se. Essa elevação de velocidade causa outro aumento de carga, o que por sua vez aumenta I_A e diminui mais o fluxo, aumentando novamente a velocidade. O resultado é que um motor CC composto diferencial é ins-

**FIGURA 8-26**

A característica de conjugado *versus* velocidade de um motor CC composto diferencial.

tável e sua velocidade tende a disparar. Essa instabilidade é *muito* pior do que a de um motor em derivação com reação de armadura. É tão ruim que um motor CC composto diferencial não é adequado para nenhuma aplicação.

Para tornar as coisas piores, é impossível dar partida a esse motor. Nas condições de partida, a corrente de armadura e a corrente do campo em série são muito elevadas. Como o fluxo em série é subtraído do fluxo em derivação, o campo em série pode na realidade inverter a polaridade magnética dos polos da máquina. Tipicamente, o motor permanece imóvel ou gira lentamente no sentido errôneo, ao mesmo tempo que os enrolamentos queimam-se, devido à excessiva corrente de armadura. Quando é necessário dar partida a um motor como esse, seu campo em série deve ser curto-circuitado, de modo que durante a partida ele se comporte como um motor comum em derivação.

Devido aos problemas de estabilidade do motor CC composto diferencial, ele quase nunca é usado *intencionalmente*. Entretanto, poderá resultar um motor composto diferencial se o sentido do fluxo de potência for invertido em um gerador composto cumulativo. Por essa razão, quando um gerador CC composto cumulativo é usado para alimentar um sistema com potência elétrica, ele terá um circuito de proteção de inversão de potência que o desligará da linha se houver uma inversão no fluxo de potência. Em nenhum conjunto de motor e gerador, no qual se espera que a potência possa fluir em ambos os sentidos, pode-se usar um motor composto diferencial e, conseqüentemente, não se pode usar um gerador composto cumulativo.

Um característica de terminal típica para um motor CC composto diferencial está mostrada na Figura 8-26.

A análise não linear de motores CC compostos

A determinação do conjugado e da velocidade de um motor CC composto está ilustrada no Exemplo 8-6.

EXEMPLO 8-6 Um motor CC composto com enrolamentos de compensação, 100 HP e 250 V, tem uma resistência interna de $0,04 \Omega$ incluindo o enrolamento em série. Há 1000 espiras por polo no enrolamento em derivação e 3 espiras por polo no enrolamento em série. A máquina está mostrada na Figura 8-27 e sua curva de magnetização está mostrada na Figura 8-9. A vazio, o resistor de campo foi ajustado para que o motor girasse a 1200 rpm. As perdas no núcleo, as mecânicas e as suplementares podem ser desprezadas.

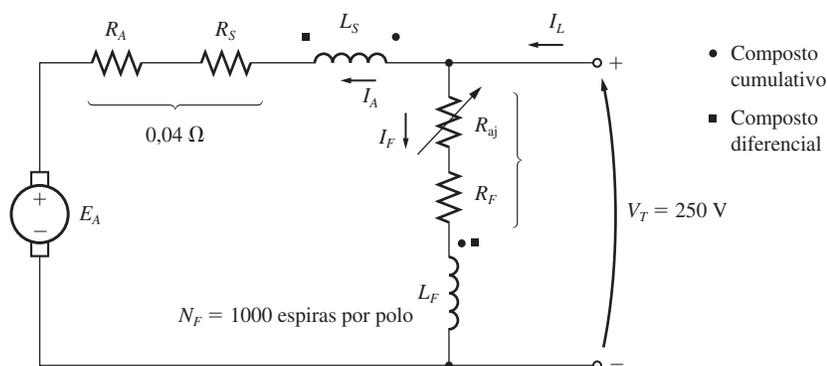


FIGURA 8-27
O motor CC composto do Exemplo 8-6.

- (a) Qual é a corrente do campo em derivação dessa máquina a vazio?
- (b) Se o motor for composto cumulativo, qual será sua velocidade quando $I_A = 200$ A.
- (c) Se o motor for composto diferencial, qual será sua velocidade quando $I_A = 200$ A.

Solução

- (a) A vazio, a corrente de armadura é zero, de modo que a tensão interna gerada do motor deve ser igual a V_T , o que significa que deve ser 250 V. Da curva de magnetização, uma corrente de campo de 5 A produz uma tensão E_A de 250 V a 1200 rpm. Portanto, a corrente do campo em derivação deve ser 5 A.
- (b) Quando uma corrente de armadura de 200 A flui no motor, a tensão interna gerada da máquina é

$$\begin{aligned} E_A &= V_T - I_A(R_A + R_S) \\ &= 250 \text{ V} - (200 \text{ A})(0,04 \Omega) = 242 \text{ V} \end{aligned}$$

A corrente de campo efetiva desse motor composto cumulativo é

$$\begin{aligned} I_F^* &= I_F + \frac{N_{SE}}{N_F} I_A - \frac{\mathcal{F}_{RA}}{N_F} \\ &= 5 \text{ A} + \frac{3}{1000} 200 \text{ A} = 5,6 \text{ A} \end{aligned} \quad (8-28)$$

Da curva de magnetização, temos $E_{A0} = 262$ V para uma velocidade $n_0 = 1200$ rpm. Portanto, a velocidade do motor será

$$\begin{aligned} n_m &= \frac{E_A}{E_{A0}} n_0 \\ &= \frac{242 \text{ V}}{262 \text{ V}} 1200 \text{ rpm} = 1108 \text{ rpm} \end{aligned}$$

- (c) Se a máquina for composta diferencial, a corrente de campo efetiva será

$$\begin{aligned} I_F^* &= I_F - \frac{N_{SE}}{N_F} I_A - \frac{\mathcal{F}_{RA}}{N_F} \\ &= 5 \text{ A} - \frac{3}{1000} 200 \text{ A} = 4,4 \text{ A} \end{aligned} \quad (8-28)$$

Da curva de magnetização, temos $E_{A0} = 236 \text{ V}$ para uma velocidade $n_0 = 1200 \text{ rpm}$. Portanto, a velocidade do motor será

$$\begin{aligned} n_m &= \frac{E_A}{E_{A0}} n_0 \\ &= \frac{242 \text{ V}}{236 \text{ V}} 1200 \text{ rpm} = 1230 \text{ rpm} \end{aligned}$$

Observe que a velocidade do motor CC composto cumulativo diminui com a carga, ao passo que a velocidade do motor CC composto diferencial aumenta com a carga.

Controle de velocidade de um motor CC composto cumulativo

As técnicas disponíveis para o controle de velocidade de um motor CC composto cumulativo são as mesmas disponíveis para um motor em derivação:

1. Mudar a resistência de campo R_F .
2. Mudar a tensão de armadura V_A .
3. Mudar a resistência de armadura R_A .

As explicações que descrevem os efeitos da variação de R_F ou V_A são muito semelhantes às que foram dadas anteriormente para o motor CC em derivação.

Teoricamente, um método semelhante poderia ser usado para controlar o motor CC composto diferencial. Esse fato é de pouca relevância porque o motor composto diferencial quase nunca é utilizado.

8.8 PARTIDA DOS MOTORES CC

Para que um motor CC faça adequadamente o seu trabalho, ele deve estar associado a alguns equipamentos especiais de controle e proteção. Os propósitos desses equipamentos são

1. Proteger o motor de danos causados por curtos-circuitos
2. Proteger o motor de danos causados por sobrecargas de longa duração
3. Proteger o motor de danos causados por correntes de partida excessivas
4. Propiciar um modo conveniente para controlar a velocidade de operação do motor

As três primeiras funções serão discutidas nesta seção e a quarta será discutida na Seção 8.9.

Problemas de partida do motor CC

Para que um motor CC funcione adequadamente, devemos protegê-lo de danos físicos durante o período de partida. Na partida, o motor não está girando e, portanto, $E_A = 0 \text{ V}$. Como a resistência interna de um motor CC normal é muito baixa, em comparação com seu tamanho (3 a 6 por unidade para motores de porte médio), uma corrente *muito* alta circula nele.

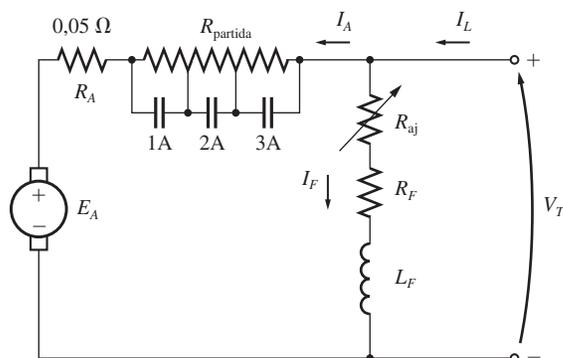


FIGURA 8-28

Um motor em derivação contendo um resistor de partida em série com a armadura. Os contatos 1A, 2A e 3A curto-circuitam porções do resistor de partida quando eles são fechados.

Considere, por exemplo, o motor de 50 HP e 250 V do Exemplo 8-1. Esse motor tem uma resistência de armadura R_A de $0,06 \Omega$ e uma corrente de plena carga menor do que 200 A, mas a corrente durante a partida é

$$\begin{aligned} I_A &= \frac{V_T - E_A}{R_A} \\ &= \frac{250 \text{ V} - 0 \text{ V}}{0,06 \Omega} = 4167 \text{ A} \end{aligned}$$

Essa corrente é superior a 20 vezes a corrente nominal de plena carga do motor. Um motor pode ser danificado de forma extremamente grave com tais correntes, mesmo que elas durem apenas um instante.

Uma solução para o problema da corrente excessiva durante a partida consiste em inserir uma *resistência de partida* em série com a armadura, restringindo o fluxo de corrente até que E_A tenha um valor suficiente para limitar a corrente. Esse resistor não deve ficar permanentemente no circuito, porque resultaria em perdas excessivas e faria com que a inclinação da característica de conjugado *versus* velocidade do motor baixasse excessivamente com o aumento da carga.

Portanto, na partida, deverá ser inserida uma resistência no circuito de armadura para limitar a corrente e após deverá ser removida novamente quando a velocidade do motor atingir um valor adequado. Na prática atual, uma resistência de partida é constituída de diversos segmentos, cada um dos quais é gradativamente removido do circuito do motor à medida que a velocidade vai crescendo. Dessa forma, com uma corrente de motor que está limitada a um valor seguro, obtém-se uma aceleração rápida sem que a resistência fique reduzida a um valor baixo demais.

A Figura 8-28 mostra um motor em derivação com uma resistência de partida extra que pode ser removida do circuito por segmentos, fechando os contatos 1A, 2A e 3A. Duas ações são necessárias para construir um sistema de partida que funcione. A primeira é determinar os valores e o número de segmentos necessários para manter a corrente de partida dentro dos limites desejados. A segunda ação é projetar um circuito de controle que feche os contatos dos segmentos da resistência de partida nos momentos adequados para remover do circuito cada um deles.

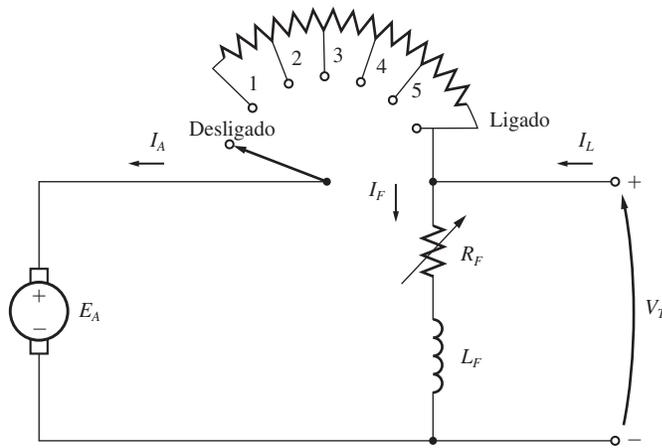


FIGURA 8-29
Um circuito manual de partida para um motor CC.

Alguns sistemas antigos de partida para motores CC usavam um resistor contínuo de partida, que gradativamente era removido do circuito por uma pessoa que ia movendo uma alavanca (Figura 8-29). Esse tipo de dispositivo de partida tinha problemas, já que dependia grandemente da pessoa para que ela não movesse a alavanca nem muito rapidamente nem muito vagarosamente. Se a resistência fosse diminuída muito rapidamente (antes que o motor pudesse ganhar velocidade suficiente), a corrente resultante seria demasiadamente elevada. Por outro lado, se a resistência fosse diminuída muito vagarosamente, o resistor de partida poderia queimar. Como dependiam de uma pessoa para que funcionassem corretamente, esses dispositivos de partida estavam sujeitos ao problema de erro humano. Nas novas instalações, eles foram quase que totalmente substituídos por circuitos de partida automática.

O Exemplo 8-7 ilustra a escolha do valor e do número de segmentos de uma resistência necessária a um circuito de partida automática. A questão relacionada com o instante de remoção de cada segmento do circuito de armadura será examinada mais adiante.

EXEMPLO 8-7 A Figura 8-28 mostra um motor CC em derivação de 100 HP, 250 V e 350 A, com uma resistência de armadura de $0,05 \Omega$. Desejamos projetar um circuito de partida para esse motor que limite a corrente máxima de partida ao *dobro* do seu valor nominal e que gradativamente desconecte os segmentos da resistência de partida, à medida que a corrente baixa até o seu valor nominal.

- (a) Quantos estágios de resistência de partida serão necessários para limitar a corrente aos valores especificados?
- (b) Qual deve ser o valor de cada segmento da resistência? Com qual tensão, deve cada estágio da resistência de partida ser desligado?

Solução

- (a) A resistência de partida deve ser escolhida de modo que a corrente seja igual ao dobro da corrente nominal do motor quando ele é ligado inicialmente à linha. À medida que o motor começa a ganhar velocidade, uma tensão gerada interna E_A será produzida no

motor. Como essa tensão opõe-se à tensão de terminal do motor, a tensão gerada interna, que está em elevação, diminui o fluxo de corrente do motor. Quando essa corrente baixa até o valor nominal, um segmento da resistência de partida deve ser removido para que a corrente de partida volte novamente a 200% da corrente nominal. Quando o motor continua a ganhar velocidade, a tensão E_A continua subindo e a corrente de armadura continua caindo. Quando a corrente do motor desce novamente até o valor nominal, outro segmento da resistência de partida deve ser removido. Esse processo é repetido até que a resistência de partida a ser removida em um dado estágio seja menor do que a resistência do circuito de armadura do motor. Nesse ponto, a própria resistência de armadura do motor limitará a corrente a um valor seguro.

Quanto estágios são necessários para obter a limitação de corrente? Para descobrir, defina R_{tot} como resistência original do circuito de partida. Assim, R_{tot} é a soma das resistências dos segmentos mais a resistência do circuito de armadura do motor:

$$R_{\text{tot}} = R_1 + R_2 + \dots + R_A \quad (8-29)$$

Agora, defina $R_{\text{tot}, i}$ como a resistência total que permanece no circuito de partida após os segmentos 1 até i terem sido removidos. A resistência que permanece no circuito após a remoção dos segmentos 1 até i é

$$R_{\text{tot}, i} = R_{i+1} + \dots + R_A \quad (8-30)$$

Observe também que a resistência de partida inicial deve ser

$$R_{\text{tot}} = \frac{V_T}{I_{\text{max}}}$$

No primeiro estágio do circuito de partida, a resistência R_1 deve ser removida do circuito quando a corrente I_A cai até

$$I_A = \frac{V_T - E_A}{R_{\text{tot}}} = I_{\text{min}}$$

Depois de remover esse segmento de resistência, a corrente de armadura deve saltar para

$$I_A = \frac{V_T - E_A}{R_{\text{tot}, 1}} = I_{\text{max}}$$

Como $E_A (= K\phi\omega)$ é diretamente proporcional à velocidade do motor, que não pode mudar instantaneamente, o valor de $V_T - E_A$ mantém-se constante no instante em que o segmento é removido. Portanto,

$$I_{\text{min}}R_{\text{tot}} = V_T - E_A = I_{\text{max}}R_{\text{tot}, 1}$$

ou seja, a resistência que permanece no circuito após a remoção do primeiro segmento é

$$R_{\text{tot}, 1} = \frac{I_{\text{min}}}{I_{\text{max}}} R_{\text{tot}} \quad (8-31)$$

Ampliando esse raciocínio, vemos que a resistência que permanece no circuito após o estágio n é

$$R_{\text{tot}, n} = \left(\frac{I_{\text{min}}}{I_{\text{max}}}\right)^n R_{\text{tot}} \quad (8-32)$$

O processo de partida estará completo quando $R_{\text{tot}, n}$ no estágio n for igual ou menor do que a resistência interna de armadura R_A do motor. Nesse ponto, a própria R_A pode limitar a corrente ao valor desejado. Quando $R_A = R_{\text{tot}, n}$, temos

$$R_A = R_{\text{tot}, n} = \left(\frac{I_{\min}}{I_{\max}} \right)^n R_{\text{tot}} \quad (8-33)$$

$$\frac{R_A}{R_{\text{tot}}} = \left(\frac{I_{\min}}{I_{\max}} \right)^n \quad (8-34)$$

Isolando n , obtemos

$$n = \frac{\log(R_A/R_{\text{tot}})}{\log(I_{\min}/I_{\max})} \quad (8-35)$$

em que n deve ser arredondado para o valor inteiro seguinte, porque não é possível ter um número fracionário de estágios de partida. Se n tiver uma parte fracionária, então, quando a resistência de partida do estágio final for removida, a corrente de armadura do motor saltará para um valor menor do que $I_{\text{max-padrão}}$.

Nesse problema em particular, a razão $I_{\min}/I_{\max} = 0,5$ e R_{tot} é

$$R_{\text{tot}} - \frac{V_T}{I_{\max}} = \frac{250 \text{ V}}{700 \text{ A}} = 0,357 \ \Omega$$

Desse modo, obtemos

$$n = \frac{\log(R_A/R_{\text{tot}})}{\log(I_{\min}/I_{\max})} = \frac{\log(0,05 \ \Omega/0,357 \ \Omega)}{\log(350 \text{ A}/700 \text{ A})} = 2,84$$

O número requerido de estágios será três.

(b) O circuito de armadura conterá a resistência de armadura R_A e a resistência de partida terá três segmentos, R_1 , R_2 e R_3 . Essa configuração está mostrada na Figura 8-28.

Inicialmente, $E_A = 0 \text{ V}$ e $I_A = 700 \text{ A}$. Assim, temos

$$I_A = \frac{V_T}{R_A + R_1 + R_2 + R_3} = 700 \text{ A}$$

Portanto, a resistência total deve ser

$$R_A + R_1 + R_2 + R_3 = \frac{250 \text{ V}}{700 \text{ A}} = 0,357 \ \Omega \quad (8-36)$$

Essa resistência total permanecerá no circuito até que a corrente caia a 350 A. Isso ocorrerá quando

$$E_A = V_T = I_A R_{\text{tot}} = 250 \text{ V} - (350 \text{ A})(0,357 \ \Omega) = 125 \text{ V}$$

Quando $E_A = 125 \text{ V}$, a corrente I_A terá caído a 350 A e é o momento de remover o primeiro segmento de partida R_1 . Quando isso ocorre, a corrente salta de volta a 700 A. Portanto,

$$R_A + R_2 + R_3 = \frac{V_T - E_A}{I_{\max}} = \frac{250 \text{ V} - 125 \text{ V}}{700 \text{ A}} = 0,1786 \ \Omega \quad (8-37)$$

A resistência total permanece no circuito até que I_A caia novamente a 350 A. Isso ocorre quando E_A atinge

$$E_A = V_T - I_A R_{\text{tot}} = 250 \text{ V} - (350 \text{ A})(0,1786 \ \Omega) = 187,5 \text{ V}$$

Quando $E_A = 187,5 \text{ V}$, a corrente I_A terá baixado até 350 A e é o momento de remover o segundo segmento de partida R_2 . Quando isso ocorre, a corrente salta de volta a 700 A. Portanto,

$$R_A + R_3 = \frac{V_T - E_A}{I_{\max}} = \frac{250 \text{ V} - 187,5 \text{ V}}{700 \text{ A}} = 0,0893 \ \Omega \quad (8-38)$$

Essa resistência total permanece no circuito até que I_A caia novamente a 350 A. Isso ocorre quando E_A atinge

$$E_A = V_T - I_A R_{\text{tot}} = 250 \text{ V} - (350 \text{ A})(0,0893 \ \Omega) = 218,75 \text{ V}$$

Quando $E_A = 218,75 \text{ V}$, a corrente I_A terá baixado até 350 A e é o momento de remover o terceiro segmento de partida R_3 . Quando isso ocorre, a única resistência que permanece é a resistência interna do motor. Nesse momento, no entanto, a própria R_A pode limitar a corrente do motor a

$$\begin{aligned} I_A &= \frac{V_T - E_A}{R_A} = \frac{250 \text{ V} - 218,75 \text{ V}}{0,05 \ \Omega} \\ &= 625 \text{ A} \quad (\text{menos do que o mínimo permitido}) \end{aligned}$$

A partir desse ponto, o motor pode ganhar velocidade por si próprio.

A partir das Equações (8-34) a (8-36), os valores necessários dos segmentos de resistência podem ser calculados:

$$R_3 = R_{\text{tot},3} - R_A = 0,0893 \ \Omega - 0,05 \ \Omega = 0,0393 \ \Omega$$

$$R_2 = R_{\text{tot},2} - R_3 - R_A = 0,1786 \ \Omega - 0,0393 \ \Omega - 0,05 \ \Omega = 0,0893 \ \Omega$$

$$R_1 = R_{\text{tot},1} - R_2 - R_3 - R_A = 0,357 \ \Omega - 0,1786 \ \Omega - 0,0393 \ \Omega - 0,05 \ \Omega = 0,1786 \ \Omega$$

Os resistores R_1 , R_2 e R_3 são removidos quando a tensão E_A atinge 125, 187,5 e 218,75 V, respectivamente.

Circuitos de partida do motor CC

Após a determinação dos valores dos segmentos da resistência de partida, como é possível controlar sua conexão e desconexão do circuito, de modo que ocorram nos instantes corretos? Diversos esquemas diferentes são usados para se realizar esse chaveamento. Dois dos métodos mais comuns serão examinados nesta seção. Antes disso, no entanto, é necessário introduzir alguns dos componentes usados nos circuitos de partida de motores.

A Figura 8-30 ilustra alguns dos dispositivos comumente usados em circuitos de controle de motores. Os dispositivos mostrados são fusíveis, chaves do tipo botoeira, relés, relés de retardo e relés de sobrecarga.

A Figura 8-30a mostra o símbolo de um fusível. Em um circuito de controle de motor, os fusíveis servem para proteger o motor do perigo de curto-circuito. Eles são inseridos nas linhas de alimentação elétrica que levam ao motor. Se ocorrer um curto-circuito em um motor, os fusíveis nas linhas de alimentação elétrica queimarão, abrindo o circuito antes que qualquer dano possa ser feito ao motor.

A Figura 8-30b mostra chaves do tipo botoeira de mola. Há dois tipos básicos dessas chaves – normalmente aberta e normalmente fechada. Um contato *normalmente aberto* permanece aberto enquanto o botão não é pressionado e é fechado quando o botão é pressionado. Por outro lado, um contato *normalmente fechado* permanece fechado enquanto o botão não é pressionado e é aberto quando o botão é pressionado.

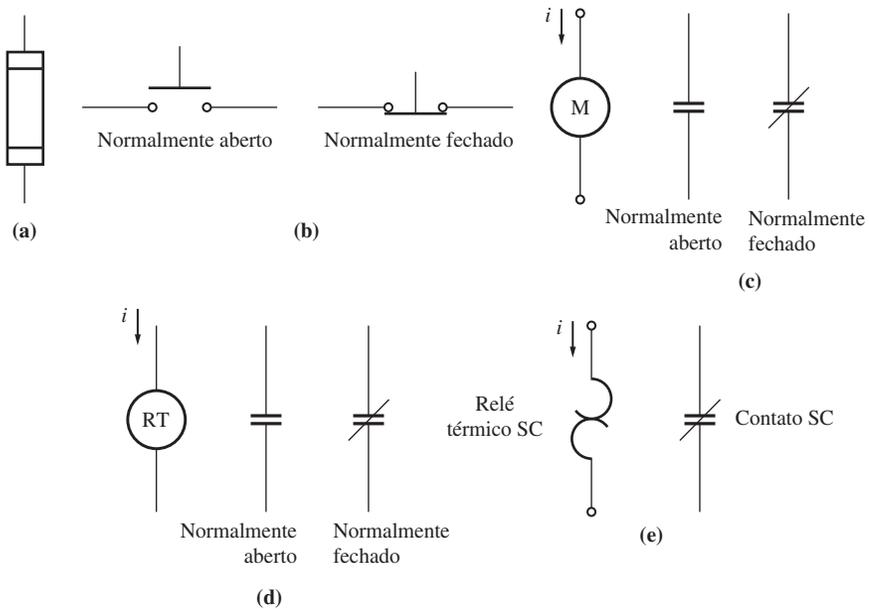


FIGURA 8-30

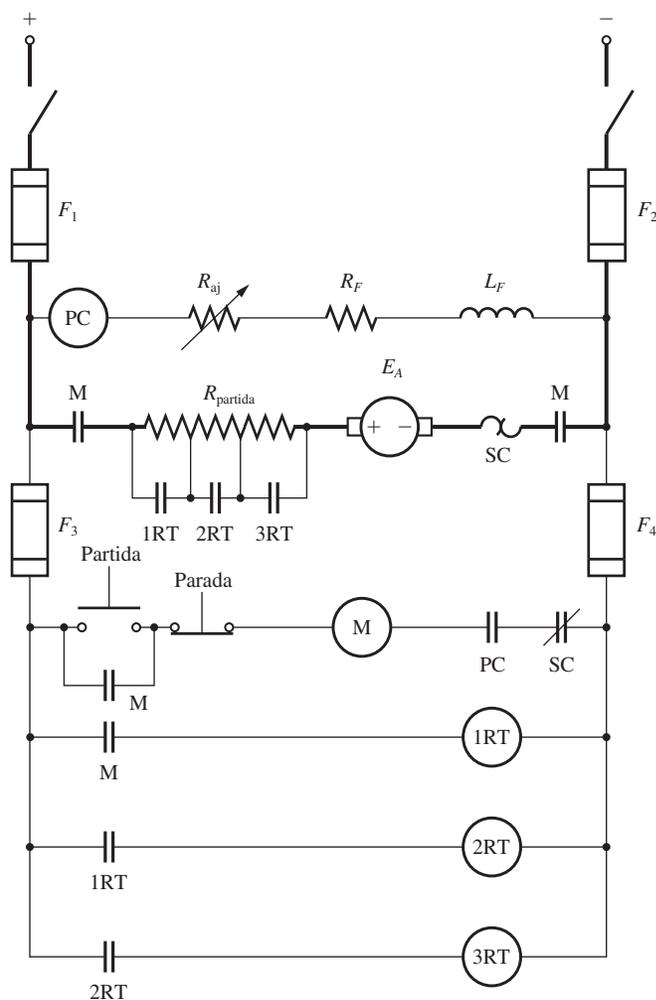
(a) Um fusível. (b) Chaves do tipo botoeira normalmente aberta e normalmente fechada. (c) Uma bobina de relé e contatos. (d) Um relé com retardo de tempo (RT) e seus contatos. (e) Relé térmico de sobrecarga (SC) e seus contatos normalmente fechados.

A Figura 8-30c mostra um relé. Ele consiste em uma bobina principal e diversos contatos. A bobina é simbolizada por um círculo e os contatos são mostrados como linhas paralelas. Há dois tipos de contatos – normalmente aberto e normalmente fechado. Um contato *normalmente aberto* permanece aberto enquanto o relé não for energizado e um contato *normalmente fechado* permanece fechado enquanto o relé não for energizado. Quando energia elétrica é aplicada ao relé (o relé é energizado), seus contatos mudam de estado: os contatos normalmente abertos fecham e os contatos normalmente fechados abrem.

Um relé com retardo de tempo está mostrado na Figura 8-30d. Ele se comporta exatamente como um relé comum, a diferença consiste em que, após ser energizado, decorre um período ajustável de tempo antes que seus contatos mudem de estado.

Um relé térmico de sobrecarga está mostrado na figura 8-30e. Consiste em uma bobina de aquecimento e alguns contatos normalmente fechados. A corrente que circula pelo motor passa através das bobinas de aquecimento. Se a carga do motor se tornar demasiadamente elevada, então a corrente que circula por ele aquecerá as bobinas, fazendo com que os contatos normalmente fechados do relé de sobrecarga se abram. Por sua vez, esses contatos podem ativar alguns tipos de circuitos de proteção do motor.

Um circuito comum de partida de motor, usando esses componentes, está mostrado na Figura 8-31. Nesse circuito, diversos relés de retardo fecham contatos depois que o motor é ligado. Ao fazer isso, cada segmento da resistência de partida é removido do circuito no momento aproximadamente correto. Nesse circuito, quando o botão de partida é apertado, o circuito de armadura do motor é ligado à sua fonte

**FIGURA 8-31**

Relés de retardo de um circuito de partida para motor CC, que removem os segmentos da resistência de partida.

de tensão e a máquina arranca com toda a resistência do circuito. Entretanto, o relé de retardo de tempo 1RT é energizado no mesmo instante em que o motor arranca, de modo que após algum tempo os contatos de 1RT fecharão e removerão o primeiro segmento da resistência de partida do circuito. Ao mesmo tempo, o relé 2RT é energizado, de modo que após outro retardo os contatos de 2RT fecharão e removerão o segundo segmento da resistência de partida. Quando os contatos de 2RT fecham, o relé 3RT é energizado e o processo é repetido novamente. Finalmente, o motor estará funcionando a plena velocidade, sem nenhuma resistência de partida presente em seu circuito. Se os retardos forem escolhidos adequadamente, os segmentos da resistência de partida poderão ser removidos exatamente nos instantes corretos, de modo que a corrente do motor fica limitada aos valores do projeto.

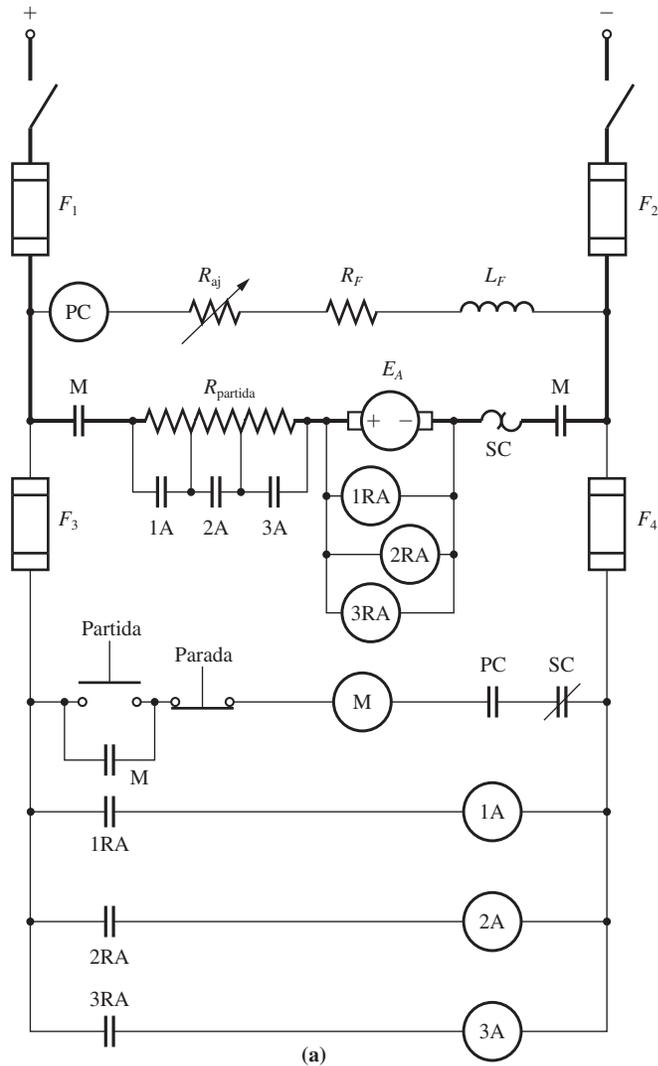


FIGURA 8-32

(a) Um circuito de partida para motor CC, que usa três relés auxiliares (RA) sensores de contratensão (E_A) para remover os segmentos da resistência de partida.

Outro tipo de circuito de partida de motor está mostrado na Figura 8-32. Aqui, diversos relés sensores medem o valor de E_A do motor e removem segmentos da resistência de partida, à medida que E_A eleva-se até os níveis anteriormente ajustados. Esse tipo de circuito de partida é melhor que o anterior, porque, se o motor estiver pesadamente carregado e arrancar mais lentamente do que o normal, os segmentos da sua resistência de partida ainda serão gradativamente removidos à medida que a corrente cai até o valor adequado.

Observe que ambos os circuitos de partida têm um relé denominado PC inserido no circuito de campo. Trata-se de um *relé de perda de campo* (PC). Se a corrente de

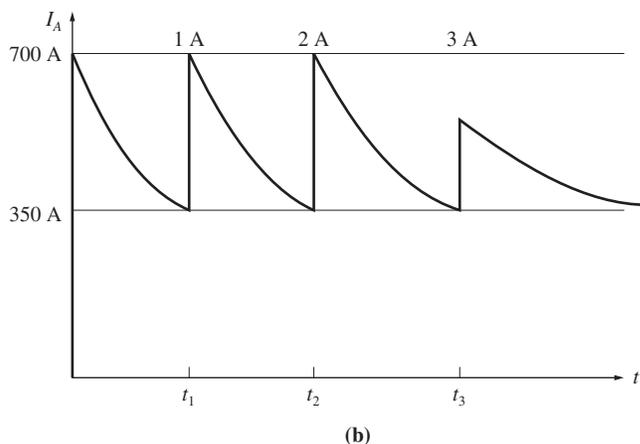


FIGURA 8-32 (conclusão)

(b) A corrente de armadura de um motor CC durante a partida.

campo for interrompida por alguma razão, o relé de perda de campo será desenergizado, o que por sua vez desligará o relé M (Motor). Quando isso ocorre, seus contatos normalmente abertos são abertos e o motor é desligado da fonte de potência. Esse relé evita que a velocidade do motor dispare quando ocorre uma interrupção da corrente.

Observe também que há um relé de sobrecarga (SC) em cada um dos circuitos de partida de motor. Se a potência solicitada do motor tornar-se excessiva, esses relés aquecerão e abrirão os contatos SC normalmente fechados, desligando assim o relé M. Quando o relé M é desenergizado, seus contatos normalmente abertos abrem e desligam o motor da fonte de potência, de modo que o motor fica protegido de danos devidos a cargas excessivas prolongadas.

8.9 O SISTEMA WARD-LEONARD E OS CONTROLADORES DE VELOCIDADE DE ESTADO SÓLIDO

A velocidade de um motor CC de excitação independente, em derivação ou composto pode ser variada de três formas: mudando a resistência de campo, mudando a tensão de armadura ou mudando a resistência de armadura. Desses métodos, talvez o mais útil é o de controle por tensão de armadura, porque permite amplas variações de velocidade sem afetar o conjugado máximo do motor.

Ao longo dos anos, diversos sistemas de controle de motores foram desenvolvidos para tirar proveito dos conjugados elevados e das velocidades variáveis que são possíveis com o uso do controle da tensão de armadura dos motores CC. Antes que os componentes de estado sólido se tornassem disponíveis, era difícil produzir uma tensão CC variável. De fato, o método normal de variar a tensão de armadura de um motor CC era usando seu próprio gerador CC separado.

Um sistema de controle da tensão de armadura desse tipo está mostrado na Figura 8-33. Essa figura mostra um motor CA servindo de máquina primária para um gerador CC, que por sua vez é usado para suprir uma tensão CC a um motor CC.

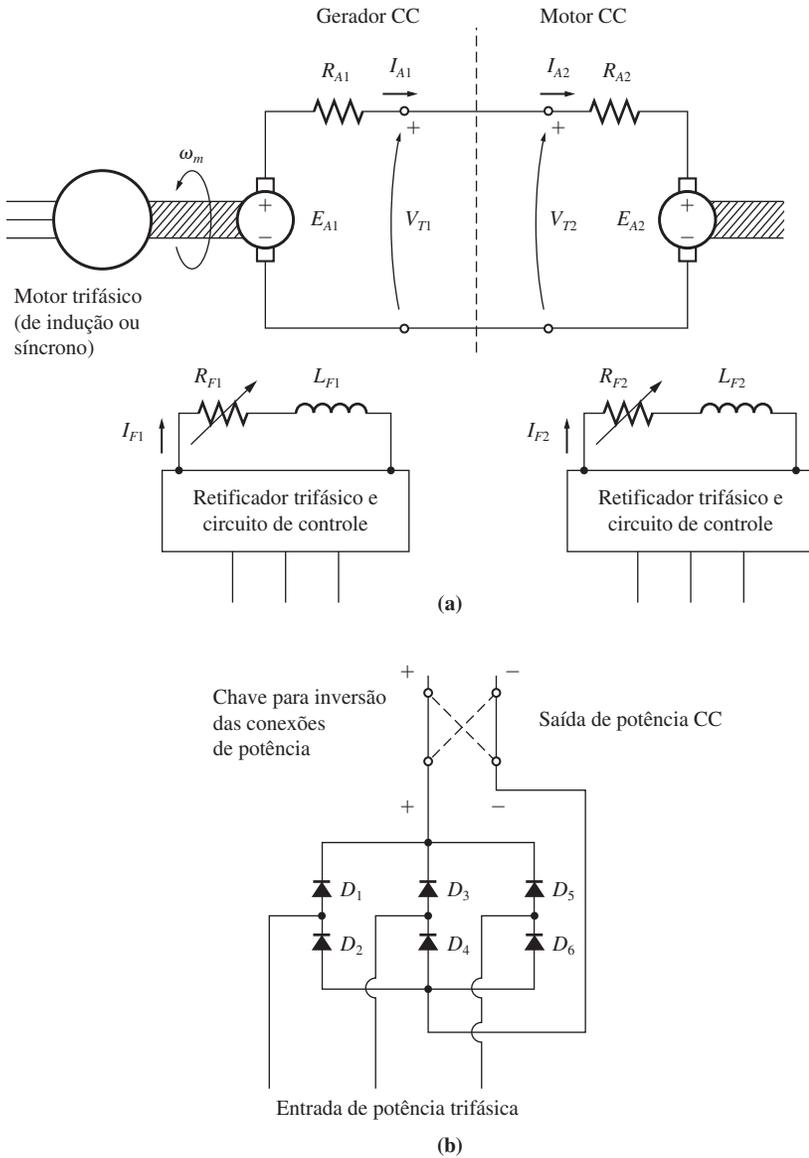


FIGURA 8-33 (a) Um sistema Ward-Leonard para controle de velocidade de um motor CC. (b) O circuito usado para produzir corrente de campo no gerador CC e no motor CC.

Um sistema de máquinas como esse é extremamente versátil e é denominado *sistema Ward-Leonard*.

Nesse sistema de controle para motor, a tensão de armadura do motor pode ser controlada variando a corrente de campo do gerador CC. Essa tensão de armadura permite que a velocidade do motor seja variada suavemente entre um valor muito

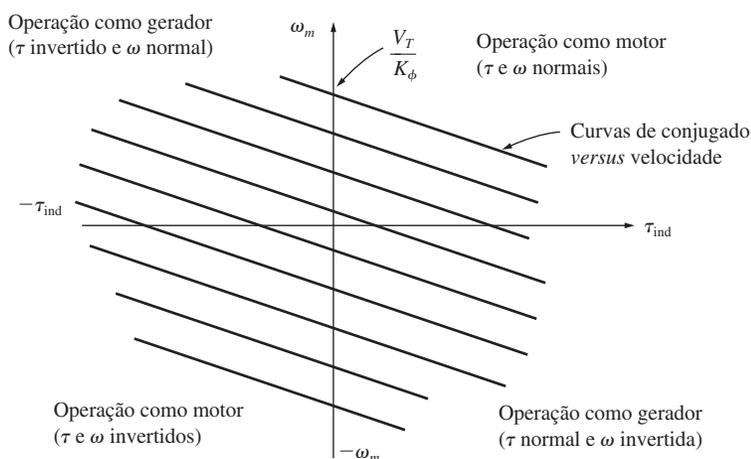


FIGURA 8-34

Faixa de funcionamento de um sistema Ward-Leonard para controle de motor. Essa máquina pode operar como motor em sentido normal (avante) no quadrante 1 ou em sentido inverso (ré) no quadrante 3. Também pode operar como gerador (regeneração ou devolução de energia) nos quadrantes 2 e 4.

pequeno e a velocidade base. A velocidade do motor pode ser ajustada para valores acima da velocidade base reduzindo a corrente de campo do motor. Com uma configuração tão flexível, torna-se possível um controle total da velocidade do motor.

Além disso, se a corrente de campo do gerador for invertida, então a polaridade da tensão de armadura do gerador também será invertida. Isso inverterá o sentido de rotação do motor. Portanto, com um sistema Ward-Leonard para controle de motor CC, é possível obter uma faixa muito ampla de variação de velocidade *em ambos os sentidos de rotação*.

Outra vantagem do sistema Ward-Leonard é a possibilidade de “regenerar”, ou devolver, a energia mecânica da máquina às linhas de alimentação. Se uma carga pesada for inicialmente içada e em seguida baixada pelo motor CC de um sistema Ward-Leonard, então o motor CC atuará como gerador durante o abaixamento da carga, devolvendo a energia ao sistema de potência. Dessa forma, grande parte da energia inicialmente necessária para elevar a carga pode ser recuperada, reduzindo os custos totais de operação da máquina.

Os modos possíveis de operação da máquina CC estão mostrados no diagrama de conjugado *versus* velocidade da Figura 8-34. Quando esse motor está girando no sentido normal (avante) e fornecendo um conjugado no sentido de rotação, ele está operando no primeiro quadrante dessa figura. Se a corrente de campo do gerador for invertida, então a tensão de terminal do gerador será invertida, o que por sua vez inverterá a tensão de armadura do motor. Quando isso ocorrer e se a corrente de campo do motor permanecer inalterada, então ambos o conjugado e a velocidade do motor serão invertidos e o motor estará operando como motor no terceiro quadrante do diagrama. Se isoladamente o conjugado ou a velocidade do motor for invertido e respectivamente a velocidade ou o conjugado permanecer inalterado, então a máquina servirá como gerador, devolvendo energia ao sistema de potência CC. Como um

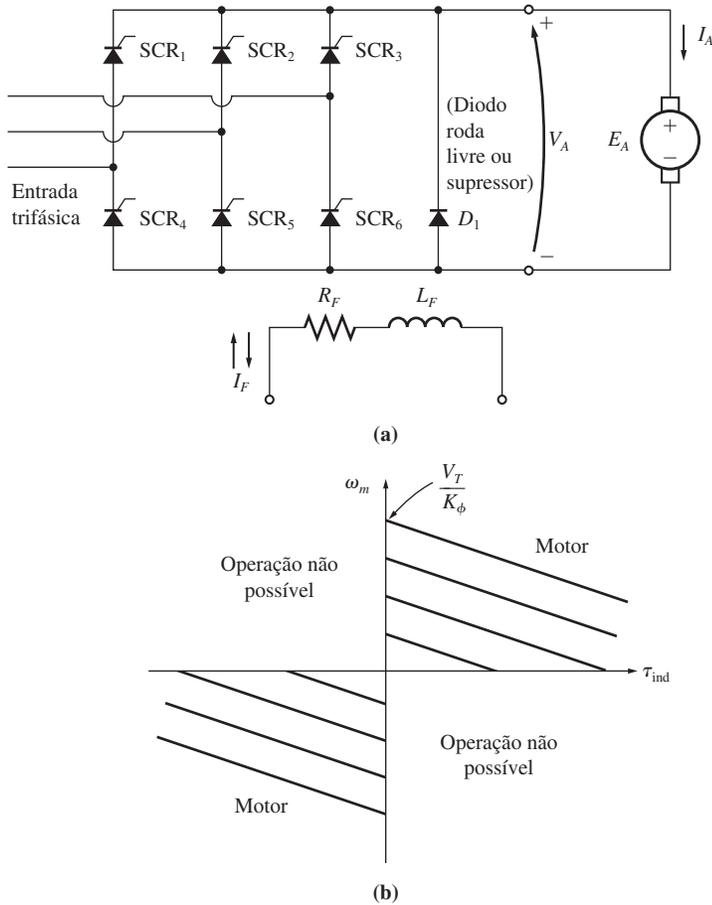


FIGURA 8-35

(a) Um controlador de estado sólido com dois quadrantes para motor CC. Como a corrente não pode circular para fora do terminal positivo da armadura, esse motor não pode funcionar como gerador, devolvendo energia ao sistema de potência. (b) Os quadrantes possíveis de funcionamento desse controlador de motor.

sistema Ward-Leonard permite a rotação e a regeneração em ambos os sentidos, ele é denominado *sistema de controle de quatro quadrantes*.

As desvantagens de um sistema Ward-Leonard são óbvias. A primeira delas é que o usuário é obrigado a comprar *três* máquinas completas de especificações nominais basicamente iguais, o que é bastante dispendioso. A outra é que três máquinas serão muito menos eficientes do que apenas uma. Devido ao seu custo e à sua eficiência relativamente baixa, o sistema Ward-Leonard foi substituído nas novas aplicações por circuitos controladores baseados em tiristores.

Um circuito simples controlador da tensão CC de armadura está mostrado na Figura 8-35. A tensão média aplicada à armadura do motor e, portanto, a velocidade média do motor dependem da fração de tempo durante a qual a tensão de alimentação é aplicada à armadura. Isso, por sua vez, depende da fase relativa na qual os ti-

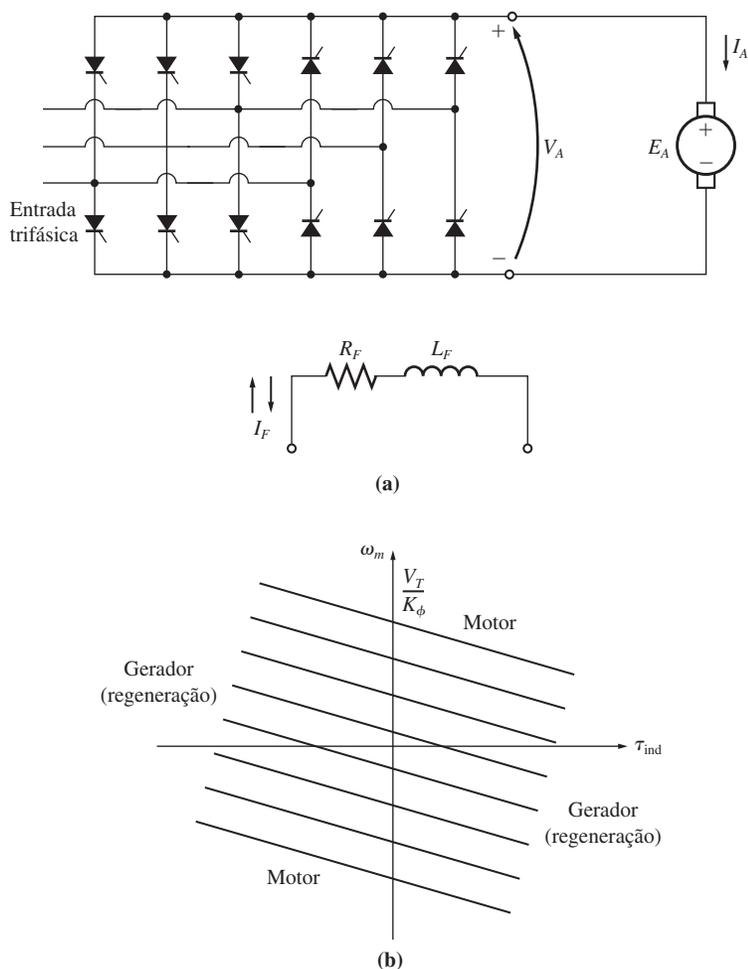


FIGURA 8-36

(a) Um controlador de estado sólido com quatro quadrantes para motor CC. (b) Os quadrantes possíveis de funcionamento desse controlador de motor.

ristores do circuito de retificação são disparados. Esse circuito em particular é capaz de fornecer uma tensão de armadura com somente uma polaridade. Desse modo, a velocidade do motor só pode ser invertida fazendo uma inversão de polaridade nas conexões do seu campo. Observe que uma corrente de armadura não pode circular para fora do terminal positivo do motor, porque em um tiristor a corrente não pode circular ao contrário. Portanto, esse motor *não pode* fazer regeneração de energia e qualquer energia fornecida ao motor não poderá ser recuperada. Esse tipo de circuito de controle é um sistema controlador de dois quadrantes, como está mostrado na Figura 8-35b.

Um circuito mais avançado capaz de fornecer uma tensão de armadura com ambas as polaridades está mostrado na Figura 8-36. Esse circuito de controle da tensão de armadura permite que uma corrente circule para fora do terminal positivo do gera-

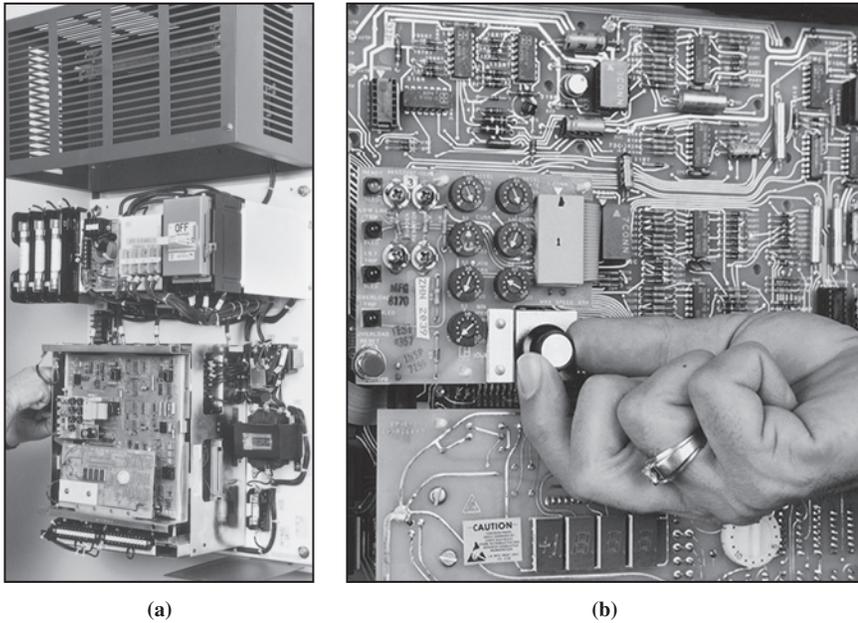


FIGURA 8-37

(a) Um controlador típico de estado sólido para motor CC em derivação. (Cortesia de *MagneTek, Inc.*) (b) Uma vista detalhada da placa com os circuitos eletrônicos de baixa potência. Pode-se ver os ajustes para os limites de corrente, a taxa de aceleração, a taxa de desaceleração, a velocidade mínima e a velocidade máxima. (Cortesia de *MagneTek, Inc.*)

dor, de modo que um motor com esse tipo de controle pode realizar a regeneração de energia. Se a polaridade do circuito de campo do motor também puder ser invertida, então o circuito de estado sólido funcionará como um controlador completo de quatro quadrantes, tal qual o sistema Ward-Leonard.

Um controlador de dois quadrantes ou um completo de quatro quadrantes, construído com tiristores, é mais barato do que as duas máquinas extras necessárias ao sistema Ward-Leonard. Assim, nas novas aplicações, os sistemas de controle de velocidade de estado sólido estão substituindo largamente os sistemas Ward-Leonard.

Um controlador típico de dois quadrantes para motor CC em derivação com controle da velocidade por tensão de armadura está mostrado na Figura 8-37 e um diagrama de blocos simplificado está mostrado na Figura 8-38. Esse controlador tem uma tensão de campo constante fornecida por um retificador trifásico de onda completa e uma tensão variável de terminal de armadura fornecida por seis tiristores configurados como um retificador trifásico de onda completa. A tensão fornecida à armadura do motor é controlada pelo ajuste do ângulo de disparo dos tiristores na ponte. Como esse controlador de motor tem uma tensão de campo fixa e uma tensão de armadura variável, ele é capaz de controlar a velocidade do motor apenas em velocidades iguais ou menores do que a velocidade base (veja “Variação da Tensão de Armadura” na Seção 8.4). O circuito do controlador é idêntico ao da Figura 8-35, exceto pelo fato de que toda a eletrônica de controle e os circuitos de realimentação estão mostrados.

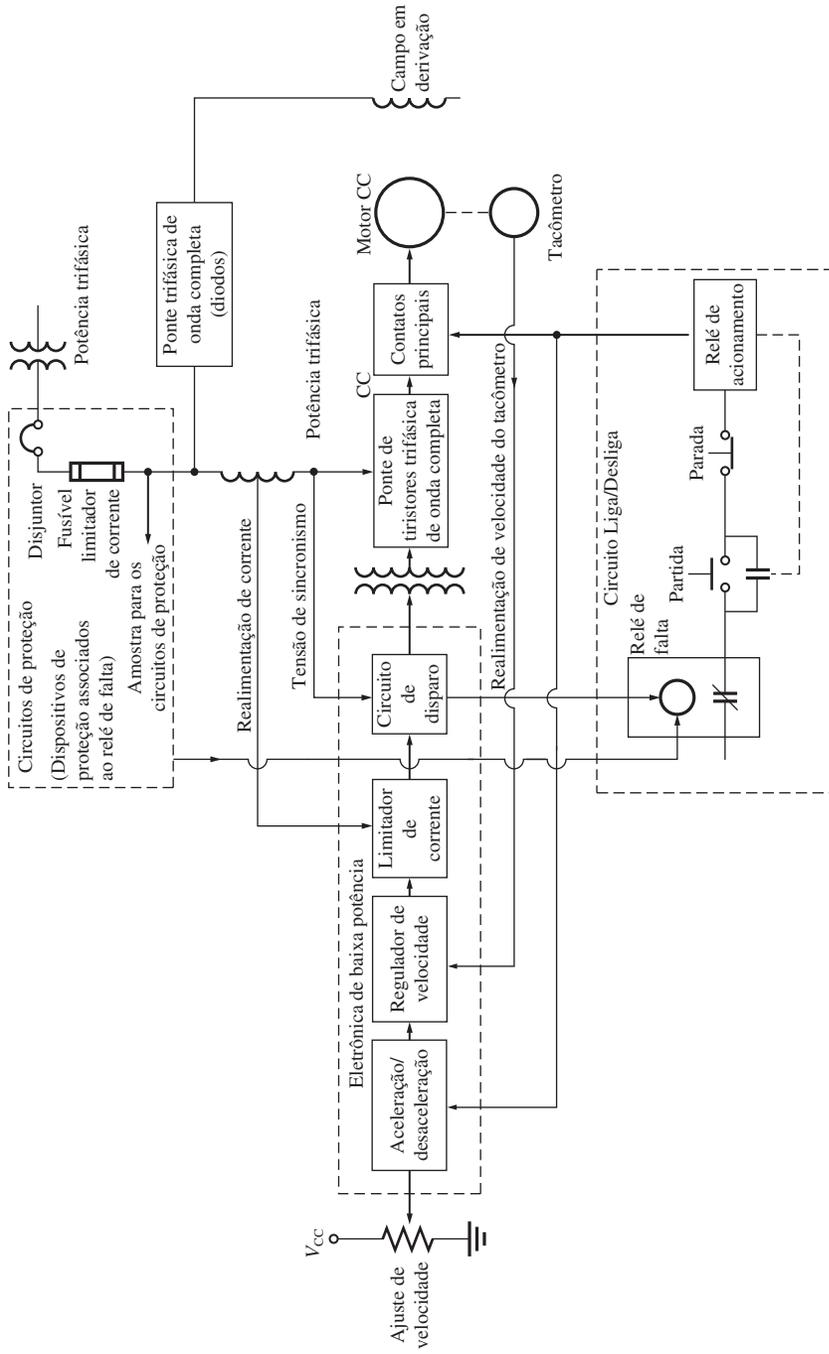


FIGURA 8-38 Um diagrama de blocos simplificado do controlador típico de estado sólido para motor CC em derivação mostrado na Figura 8-37. (Simplificação de um diagrama de blocos fornecido pela *MagneTek, Inc.*)

As seções principais desse controlador de motor CC são:

1. Seção com circuitos para proteger o motor de correntes excessivas de armadura, baixa tensão de terminal e perda da corrente de campo.
2. Circuito de partida/parada para conectar e desconectar o motor da linha.
3. Seção de eletrônica de alta potência para converter a alimentação CA trifásica em CC, que será usada nos circuitos de armadura e de campo do motor.
4. Seção de eletrônica de baixa potência que produz os pulsos de disparo para os tiristores que fornecem a tensão de armadura do motor. Essa seção contém diversas subseções importantes, que serão descritas a seguir.

Seção dos circuitos de proteção

A seção dos circuitos de proteção combina diversos dispositivos que em conjunto asseguram o funcionamento sem danos do motor. Alguns dispositivos típicos de segurança incluídos nesse tipo de controlador são

1. *Fusíveis limitadores de corrente*, que têm a finalidade de rapidamente e em segurança desligar o motor da linha de potência no caso de ocorrer um curto-circuito dentro do motor. Esses fusíveis podem interromper correntes de até diversas centenas de milhares de ampères.
2. *Circuito de proteção de sobrecarga estático instantâneo*, que desliga o motor quando a corrente de armadura excede 300% do seu valor nominal. Se a corrente de armadura ultrapassar o valor máximo permitido, esse circuito de proteção ativará o relé de falta, que desenergizará o relé de acionamento, abrindo os contatos principais e desconectando o motor da linha.
3. *Circuito de proteção de sobrecarga de tempo inverso*, que protege contra condições de sobrecorrente prolongada. Uma sobrecorrente não é suficientemente elevada para acionar o circuito de proteção de sobrecarga estático instantâneo, mas suficientemente elevada para danificar o motor no caso de a condição se manter indefinidamente. A expressão *tempo inverso* implica que, quanto mais elevada for a sobrecorrente circulando no motor, mais rapidamente atuará o circuito de proteção de sobrecarga. (Figura 8-39). Por exemplo, um circuito de proteção de tempo inverso poderia levar um minuto completo para atuar se a corrente fosse 150% da corrente nominal do motor, mas levaria 10 segundos para disparar se a corrente fosse 200% da corrente nominal do motor.
4. *Circuito de proteção de subtensão*, que desliga o motor quando a tensão de linha que alimenta o motor cai mais do que 20%.
5. *Circuito de proteção de perda de campo*, que desliga o motor quando o circuito de campo é perdido.
6. *Circuito de proteção de sobretemperatura*, que desliga o motor quando há risco de sobreaquecimento.

Seção do circuito de partida/parada

A seção do circuito de partida/parada contém os controles necessários para dar a partida e realizar a parada do motor. Isso é obtido fazendo-se a abertura ou fechamento

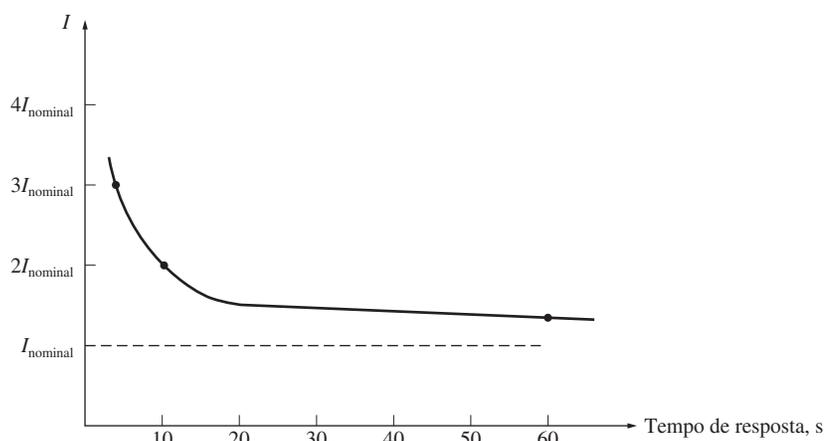


FIGURA 8-39

Característica de um circuito de proteção de sobrecarga de tempo inverso.

dos contatos principais que ligam o motor à linha. O acionamento do motor é realizado pressionando o botão de partida. O desligamento é obtido tanto apertando o botão de parada quanto energizando o relé de falta. Em ambos os casos, o relé de acionamento é desenergizado e os contatos principais que ligam o motor à linha são abertos.

Seção de eletrônica de alta potência

A seção de eletrônica de alta potência contém um circuito retificador de onda completa com diodos para fornecer uma tensão constante ao circuito de campo do motor. Essa seção também contém um circuito retificador de onda completa com tiristores para fornecer uma tensão variável ao circuito de armadura do motor.

Seção de eletrônica de baixa potência

A seção de eletrônica de baixa potência produz pulsos para disparar os tiristores que fornecem a tensão de armadura ao motor. Alterando o tempo de disparo dos tiristores, a tensão de armadura média do motor é ajustada. Nesta seção de eletrônica de baixa potência, encontramos os seguintes subsistemas:

1. *Circuito de regulação de velocidade.* Este circuito mede a velocidade do motor com um tacômetro, compara essa velocidade com a velocidade desejada (um nível de tensão de referência) e incrementa ou decrementa a tensão de armadura na medida do necessário para manter a velocidade constante no valor desejado. Por exemplo, suponha que ocorra um aumento de carga no eixo do motor. Se houver um incremento de carga, então a velocidade do motor diminuirá. A diminuição de velocidade reduzirá a tensão gerada pelo tacômetro. O valor dessa tensão alimenta o circuito regulador de velocidade. Como o nível de tensão correspondente à velocidade do motor caiu abaixo da tensão de referência, então o circuito regulador de velocidade irá alterar o tempo de disparo dos tiristores, produzindo uma tensão de armadura maior. Essa tensão de armadura aumentada tenderá a elevar a velocidade do motor de volta ao nível desejado (veja a Figura

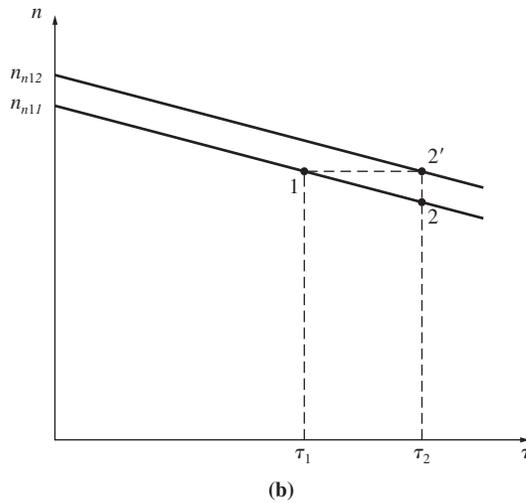
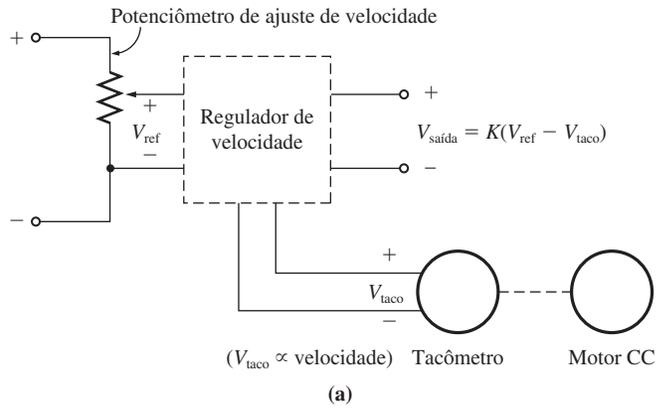


FIGURA 8-40

(a) O circuito regulador de velocidade produz uma tensão de saída que é proporcional à diferença entre a velocidade desejada do motor (ajustada por V_{ref}) e a velocidade real do motor (medida por V_{taco}). Essa tensão de saída é aplicada ao circuito de disparo de tal forma que, quanto maior se torna a tensão de saída, mais cedo os tiristores de acionamento são disparados e mais elevada torna-se a tensão de terminal. (b) O efeito do aumento de carga em um motor CC em derivação com um regulador de velocidade. A carga do motor é aumentada. Então, se não houvesse regulador presente, a velocidade do motor diminuiria e operaria no ponto 2. No entanto, quando o regulador está presente, ele detecta a diminuição de velocidade e altera a tensão de armadura do motor para compensar a diminuição. Isso eleva por inteiro a curva característica de conjugado *versus* velocidade do motor, resultando que o funcionamento se desloca-se para o ponto 2'.

8-40). Com um projeto adequado, um circuito desse tipo pode propiciar regulação de velocidade de 0,1% desde a vazio até plena carga.

A velocidade de funcionamento desejada é controlada pela alteração do nível da tensão de referência. Esse nível pode ser ajustado com um pequeno potenciômetro, como está mostrado na Figura 8-40.

2. *Circuito limitador de corrente.* Esse circuito mede a corrente de regime permanente que entra no motor, compara-a com a corrente máxima desejada (ajustada com um nível de tensão de referência) e diminui a tensão de armadura na medida do necessário para evitar que a corrente exceda o valor máximo desejado. A corrente máxima desejada pode ser ajustada dentro de um largo intervalo, digamos de 0 a 200% ou mais da corrente nominal do motor. Tipicamente, esse limite de corrente deve ser ajustado com um valor superior à corrente nominal, de modo que o motor possa acelerar em condições de plena carga.
3. *Circuito de aceleração/desaceleração.* Esse circuito limita a aceleração e desaceleração do motor a um valor seguro. Sempre que for comandada uma alteração dramática de velocidade, esse circuito intervirá para garantir que a passagem da velocidade original à nova velocidade seja suave e não cause transitórios excessivos de corrente de armadura no motor.

O circuito de aceleração/desaceleração elimina por completo a necessidade de uma resistência de partida, porque a partida do motor é simplesmente outro tipo de variação grande de velocidade e o circuito de aceleração/desaceleração atua causando um aumento suave de velocidade no tempo. Esse aumento gradual de velocidade limita a corrente de armadura da máquina a um valor seguro.

8.10 CÁLCULOS DE EFICIÊNCIA DO MOTOR CC

Para calcular a eficiência de um motor CC, as seguintes perdas devem ser determinadas:

1. Perdas no cobre
2. Perdas nas escovas
3. Perdas mecânicas
4. Perdas no núcleo
5. Perdas suplementares

As perdas no cobre do motor são as perdas I^2R que ocorrem nos circuitos da armadura e do campo do motor. Essas perdas podem ser obtidas conhecendo-se as correntes da máquina e as duas resistências. Para determinar a resistência do circuito de armadura da máquina, trave o rotor de modo que ele não possa girar e aplique uma *pequena* tensão CC aos terminais de armadura. Ajuste essa tensão até que a corrente na armadura seja igual à corrente nominal de armadura da máquina. A razão entre a tensão aplicada e a corrente resultante de armadura é R_A . Quando esse teste é realizado, a razão pela qual a corrente deve ser em torno do valor de plena carga é que R_A varia com a temperatura e, com o valor de plena carga da corrente, os enrolamentos de armadura estarão próximos da sua temperatura normal de funcionamento.

A resistência resultante não será inteiramente exata, porque

1. A refrigeração que está normalmente ocorrendo quando o motor está girando não estará presente.
2. Como há uma tensão CA nos condutores do rotor durante o funcionamento normal, eles apresentam algum efeito pelicular, o que aumenta mais a resistência de armadura.

A norma IEEE 113 (Referência 5) trata dos procedimentos de teste para as máquinas CC. Ela apresenta um procedimento mais exato para determinar R_A , que poderá ser usado se necessário.

A resistência de campo é determinada aplicando a tensão nominal de campo de plena carga ao circuito de campo e medindo a corrente de campo resultante. A resistência de campo R_F é simplesmente a razão entre a tensão de campo e a corrente de campo.

As perdas por queda de tensão nas escovas são frequentemente combinadas aproximadamente com as perdas no cobre. Se forem tratadas separadamente, elas poderão ser determinadas a partir de um gráfico do potencial de contato *versus* corrente para o tipo particular de escova que está sendo usado. As perdas por queda de tensão nas escovas são simplesmente o produto da queda V_{QE} na escova pela corrente de armadura I_A .

Usualmente, as perdas no núcleo e as mecânicas são determinadas em conjunto. Se for permitido que um motor gire livremente a vazio com a velocidade nominal, então não haverá potência de saída na máquina. Como o motor está sem carga, I_A é muito pequena e as perdas no cobre da armadura são desprezíveis. Portanto, se as perdas no cobre do campo forem subtraídas da potência de entrada do motor, então a potência de entrada restante deverá consistir nas perdas mecânicas e nas perdas do núcleo da máquina para aquela velocidade. Essas perdas são denominadas *perdas rotacionais a vazio* do motor. Desde que a velocidade do motor mantenha-se aproximadamente a mesma de quando as perdas foram medidas, então as perdas rotacionais a vazio constituem uma boa estimativa das perdas mecânicas e no núcleo da máquina sob carga.

O Exemplo 8-8 ilustra a determinação da eficiência de um motor.

EXEMPLO 8-8 Um motor CC em derivação de 50 HP, 250 V e 1200 rpm, tem uma corrente nominal de armadura de 170 A e uma corrente nominal de campo de 5 A. Quando seu rotor é travado, uma tensão de armadura de 10,2 V (sem as escovas) produz uma corrente de 170 A e uma tensão de campo de 250 V produz uma corrente de campo de 5 A. Assume-se que a queda de tensão nas escovas é 2 V. A vazio, com a tensão de terminal igual a 240 V, a corrente de armadura é igual a 13,2 A, a corrente de campo é 4,8 A e a velocidade do motor é 1150 rpm.

- (a) Qual é a potência de saída desse motor em condições nominais?
- (b) Qual é a eficiência do motor?

Solução

A resistência de armadura dessa máquina é aproximadamente

$$R_A = \frac{10,2 \text{ V}}{170 \text{ A}} = 0,06 \Omega$$

e a resistência de campo é

$$R_F = \frac{250 \text{ V}}{5 \text{ A}} = 50 \Omega$$

Portanto, a plena carga, as perdas I^2R na armadura são

$$P_A = (170 \text{ A})^2(0,06 \Omega) = 1734 \text{ W}$$

e as perdas I^2R no circuito de campo são

$$P_F = (5 \text{ A})^2(50 \Omega) = 1250 \text{ W}$$

As perdas nas escovas a plena carga são dadas por

$$P_{\text{escovas}} = V_{\text{QE}} I_A = (2 \text{ V})(170 \text{ A}) = 340 \text{ W}$$

As perdas rotacionais a plena carga são essencialmente equivalentes às perdas rotacionais a vazio, porque as velocidades a vazio e a plena carga do motor não diferem muito entre si. Essas perdas podem ser determinadas obtendo-se a potência de entrada do circuito de armadura a vazio e assumindo que as perdas no cobre da armadura e as devido à queda de tensão nas escovas são desprezíveis, o que significa que a potência de entrada da armadura a vazio é igual às perdas rotacionais:

$$P_{\text{tot}} = P_{\text{núcleo}} + P_{\text{mec}} = (240 \text{ V})(13,2 \text{ A}) = 3168 \text{ W}$$

(a) A potência de entrada desse motor com a carga nominal é dada por

$$P_{\text{entrada}} = V_T I_L = (250 \text{ V})(175 \text{ A}) = 43.750 \text{ W}$$

Sua potência de saída é dada por

$$\begin{aligned} P_{\text{saída}} &= P_{\text{entrada}} - P_{\text{escovas}} - P_{\text{cobre}} - P_{\text{núcleo}} - P_{\text{mec}} - P_{\text{suplementares}} \\ &= 43.750 \text{ W} - 340 \text{ W} - 1734 \text{ W} - 1250 \text{ W} - 3168 \text{ W} - (0,01)(43.750 \text{ W}) \\ &= 36.820 \text{ W} \end{aligned}$$

assumindo que as perdas suplementares representam 1% da potência de entrada.

(b) A eficiência desse motor a plena carga é

$$\begin{aligned} \eta &= \frac{P_{\text{saída}}}{P_{\text{entrada}}} \times 100\% \\ &= \frac{36.820 \text{ W}}{43.750 \text{ W}} \times 100\% = 84,2\% \end{aligned}$$

8.11 INTRODUÇÃO AOS GERADORES CC

Os geradores CC são máquinas CC usadas como geradores. Como foi observado anteriormente, não há nenhuma diferença real entre um gerador e um motor, exceto pelo sentido do fluxo de potência. Há cinco tipos principais de geradores CC, classificados de acordo com o modo de produção do fluxo de campo:

1. *Gerador de excitação independente.* No gerador de excitação independente, o fluxo de campo é obtido de uma fonte de potência separada do próprio gerador.
2. *Gerador em derivação.* No gerador em derivação, o fluxo de campo é obtido pela ligação do circuito de campo diretamente aos terminais do gerador.
3. *Gerador série.* No gerador série, o fluxo de campo é obtido ligando o circuito de campo em série com a armadura do gerador.
4. *Gerador composto cumulativo.* No gerador composto cumulativo, estão presentes ambos os campos em derivação e em série, e seus efeitos são aditivos.
5. *Gerador composto diferencial.* No gerador composto diferencial, estão presentes ambos os campos em derivação e em série, mas seus efeitos são subtrativos.

Os diversos tipos de geradores CC diferem entre si nas características de terminal (tensão *versus* corrente) e, portanto, nas aplicações às quais são adequados.

Os geradores CC são comparados entre si por suas tensões, potências nominais, eficiências e regulações de tensão. A *regulação de tensão* (RT) é definida pela equação

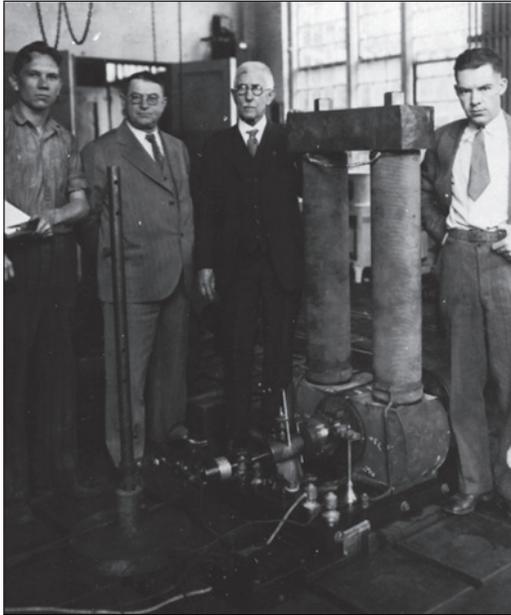


FIGURA 8-41

O primeiro gerador CC de uso prático. Essa é uma duplicata fiel do primeiro gerador comercial denominado “Mary Ann de pernas longas” de Thomas Edison. Ele foi construído em 1879 e suas especificações nominais eram 5 kW, 100 V e 1200 rpm. (Cortesia de General Electric Company.)

$$RT = \frac{V_{vz} - V_{pc}}{V_{pc}} \times 100\% \quad (8-39)$$

em que V_{vz} é a tensão de terminal sem carga, a vazio, do gerador e V_{pc} é a tensão de terminal a plena carga do gerador. É uma medida rudimentar da forma da característica de tensão *versus* corrente do gerador. Uma regulação de tensão positiva significa uma característica descendente e uma regulação de tensão negativa significa uma característica ascendente.

Todos os geradores são acionados por uma fonte de potência mecânica, que usualmente é denominada a *máquina motriz* do gerador. A máquina motriz de um gerador CC pode ser uma turbina a vapor, um motor diesel ou mesmo um motor elétrico. Como a velocidade da máquina motriz afeta a tensão de saída de um gerador e como as máquinas motrizes podem variar largamente em suas características de velocidade, costuma-se comparar a regulação de tensão e as características de saída entre diversos geradores, *assumindo que as máquinas motrizes são de velocidade constante*. Neste capítulo, assumiremos que a velocidade de um gerador é constante, a menos que seja feita uma afirmação específica em sentido contrário.

Os geradores CC são bem raros nos sistemas modernos de potência. Mesmo os sistemas de potência CC, como os dos automóveis, usam agora geradores CC mais retificadores para produzir potência CC. Entretanto, nos últimos anos, eles tiveram um ressurgimento limitado como fontes de potência para torres isoladas de telefones celulares.

O circuito equivalente de um gerador CC está mostrado na Figura 8-42 e uma versão simplificada está mostrada na Figura 8-43. Eles se assemelham aos circuitos equivalentes de um motor CC, exceto pelo fato de que o sentido da corrente e das perdas nas escovas é invertido.

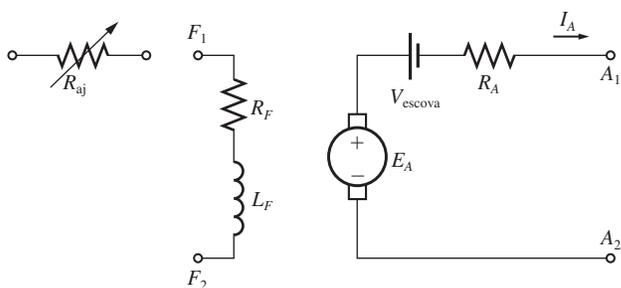


FIGURA 8-42
O circuito equivalente de um gerador CC.

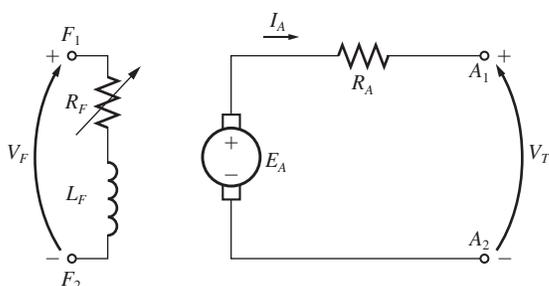


FIGURA 8-43
Um circuito equivalente simplificado de um gerador CC, com R_F combinando as resistências das bobinas de campo e a resistência variável de controle.

8.12 GERADOR DE EXCITAÇÃO INDEPENDENTE

Um gerador de excitação independente é um gerador cuja corrente de campo é suprida por uma fonte de tensão CC externa separada. O circuito equivalente dessa máquina está mostrado na Figura 8-44. Nesse circuito, a tensão V_T representa a tensão real medida nos terminais do gerador e a corrente I_L representa a corrente que circula nas linhas conectadas aos terminais. A tensão gerada interna é E_A e a corrente de armadura é I_A . Está claro que em um gerador de excitação independente a corrente de armadura é igual à corrente de linha:

$$I_A = I_L \quad (8-40)$$

A característica de terminal de um gerador CC de excitação independente

A *característica de terminal* de um dispositivo é um gráfico das grandezas de saída do dispositivo, uma *versus* a outra. No caso de um gerador CC, as grandezas de saída são sua tensão de terminal e a corrente de linha. A característica de terminal de um gerador de excitação independente é, portanto, um gráfico de V_T *versus* I_L

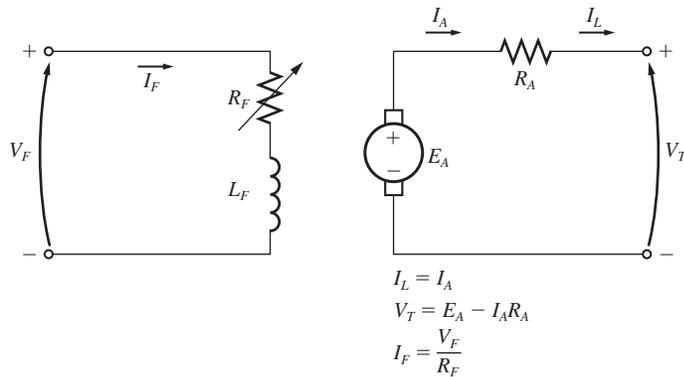


FIGURA 8-44
Um gerador de excitação independente.

para uma dada velocidade constante ω . Pela lei de Kirchhoff das tensões, a tensão de terminal é

$$V_T = E_A - I_A R_A \tag{8-41}$$

Como a tensão gerada interna é independente de I_A , a característica de terminal do gerador de excitação independente é uma linha reta, como está mostrado na Figura 8-45a.

Que acontece em um gerador desse tipo quando a carga é aumentada? Quando a carga fornecida pelo gerador é aumentada, I_L (e portanto I_A) aumenta. À medida que a corrente de armadura sobe, a queda $I_A R_A$ cresce, de modo que a tensão de terminal do gerador cai.

Essa característica de terminal nem sempre é inteiramente exata. Em geradores sem enrolamentos de compensação, um aumento em I_A causa elevação da reação de armadura, a qual leva a um enfraquecimento de fluxo. Isso causa uma diminuição em $E_A = K\phi\omega_m$, o que diminui mais ainda a tensão de terminal do gerador. A característica de terminal resultante está mostrada na Figura 8-45b. Em todos os gráficos futuros, assumiremos que os geradores têm enrolamentos de compensação, a menos que seja expresso o contrário. Entretanto, é importante ter em conta que, se os enrolamentos de compensação não estiverem presentes, a reação de armadura poderá modificar as características.

Controle da tensão de terminal

A tensão de terminal de um gerador CC de excitação independente pode ser controlada mudando a tensão interna gerada E_A da máquina. Pela lei de Kirchhoff das tensões, temos $V_T = E_A - I_A R_A$. Assim, se E_A aumentar, então V_T aumentará e, se E_A diminuir, V_T diminuirá. Como a tensão interna gerada E_A é dada pela equação $E_A = K\phi\omega_m$, há dois modos possíveis de controlar a tensão desse gerador:

1. *Alterar a velocidade de rotação.* Se ω aumentar, então $E_A = K\phi\omega_m \uparrow$ aumentará, de modo que $V_T = E_A \uparrow - I_A R_A$ também aumentará.

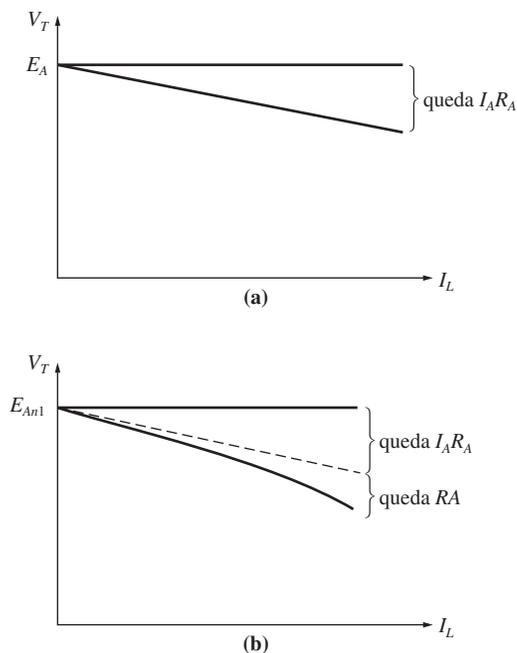


FIGURA 8-45

A característica de terminal de um gerador CC de excitação independente (a) com e (b) sem enrolamentos de compensação.

2. *Alterar a corrente de campo.* Se R_F for diminuída, então a corrente de campo aumentará ($I_F = V_F / R_F \downarrow$). Portanto, o fluxo ϕ da máquina cresce. Quando isso acontece, $E_A = K\phi\omega_m$ também deve crescer, de modo que $V_T = E_A \uparrow - I_A R_A$ aumenta.

Em muitas aplicações, a faixa de velocidade da máquina motriz é bem limitada, de modo que a tensão de terminal é mais comumente controlada pela variação da corrente de campo. Um gerador de excitação independente alimentando uma carga resistiva está mostrado na Figura 8-46a. A Figura 8-46b mostra o efeito de uma diminuição da resistência de campo sobre a tensão de terminal do gerador quando ele está operando sob carga.

Análise não linear de um gerador

Como a tensão interna gerada de um gerador é uma função não linear de sua força magnetomotriz, não é possível calcular de forma simples o valor de E_A esperado para uma dada corrente de campo. A curva de magnetização do gerador deve ser usada para calcular com exatidão sua tensão de saída para uma dada tensão de entrada.

Além disso, se uma máquina tiver reação de armadura, então seu fluxo será reduzido a cada incremento de carga, fazendo E_A diminuir. A única maneira de se determinar com exatidão a tensão de saída em uma máquina com reação de armadura é pelo uso de análise gráfica.

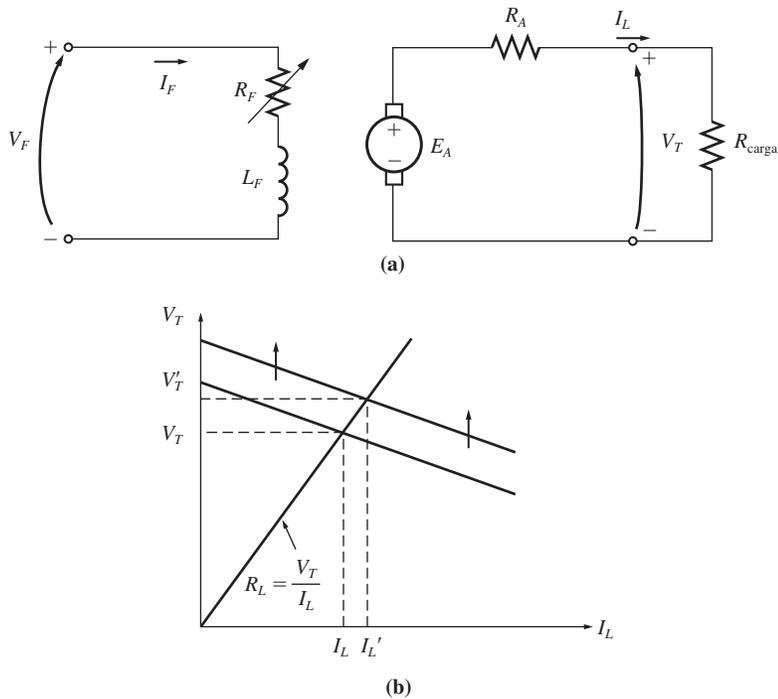


FIGURA 8-46 (a) Um gerador CC de excitação independente com a carga resistiva. (b) O efeito da diminuição na resistência de campo sobre a tensão de saída do gerador.

A força magnetomotriz total de um gerador de excitação independente é a força magnetomotriz do circuito de campo menos a força magnetomotriz devido à reação de armadura (RA):

$$\mathcal{F}_{\text{liq}} = N_F I_F - \mathcal{F}_{\text{RA}} \tag{8-42}$$

Como ocorre com os motores CC, costuma-se definir uma *corrente de campo equivalente* como a corrente que produziria a mesma tensão de saída como resultado da combinação de todas as forças magnetomotrizes presentes na máquina. A tensão resultante E_{A0} pode ser determinada localizando a corrente de campo equivalente sobre a curva de magnetização. A corrente de campo equivalente de um gerador CC de excitação independente é dada por

$$I_F^* = I_F - \frac{\mathcal{F}_{\text{RA}}}{N_F} \tag{8-43}$$

Além disso, a diferença entre a velocidade na curva de magnetização e a velocidade real do gerador deve ser levada em consideração usando a Equação (8-13);

$$\frac{E_A}{E_{A0}} = \frac{n_m}{n_0} \tag{8-13}$$

O exemplo seguinte ilustra a análise de um gerador CC de excitação independente.

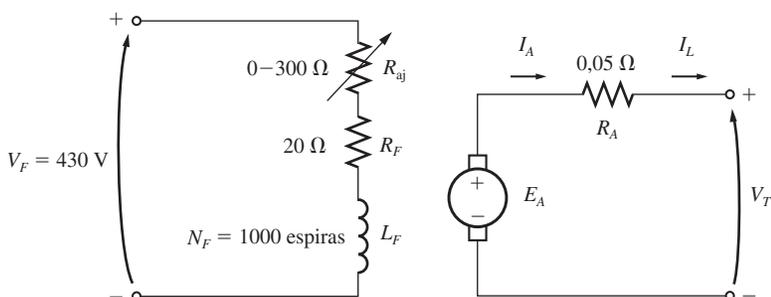


FIGURA 8-47

O gerador de excitação independente do Exemplo 8-9.

EXEMPLO 8-9 Um gerador CC de excitação independente tem especificações nominais de 172 kW, 430 V, 400 A e 1800 rpm. O gerador está mostrado na Figura 8-47 e a sua curva de magnetização está na Figura 8-48. Essa máquina tem as seguintes características:

$$\begin{aligned} R_A &= 0,05 \, \Omega & V_F &= 430 \, \text{V} \\ R_F &= 20 \, \Omega & N_F &= 1000 \, \text{espiras por pólo} \\ R_{aj} &= 0 \text{ a } 300 \, \Omega \end{aligned}$$

- Se o resistor ajustável R_{aj} do circuito de campo desse gerador for ajustado para $63 \, \Omega$ e a máquina motriz estiver acionando o gerador a 1600 rpm, qual será a tensão de terminal a vazio do gerador?
- Qual seria sua tensão se uma carga de 360 A fosse conectada aos seus terminais? Assuma que o gerador tem enrolamentos de compensação.
- Qual seria sua tensão se uma carga de 360 A fosse conectada aos seus terminais, mas o gerador não tivesse enrolamentos de compensação? Assuma que sua reação de armadura é $450 \, \text{A} \cdot \text{e}$ para essa carga.
- Que ajuste poderia ser feito no gerador para que a sua tensão de terminal voltasse ao valor encontrado na parte (a)?
- Quanta corrente de campo seria necessária para que a tensão de terminal voltasse ao valor a vazio? (Assuma que a máquina tem enrolamentos de compensação.) Qual é o valor requerido do resistor R_{aj} para que isso seja possível?

Solução

- (a) Se resistência total do circuito de campo do gerador for

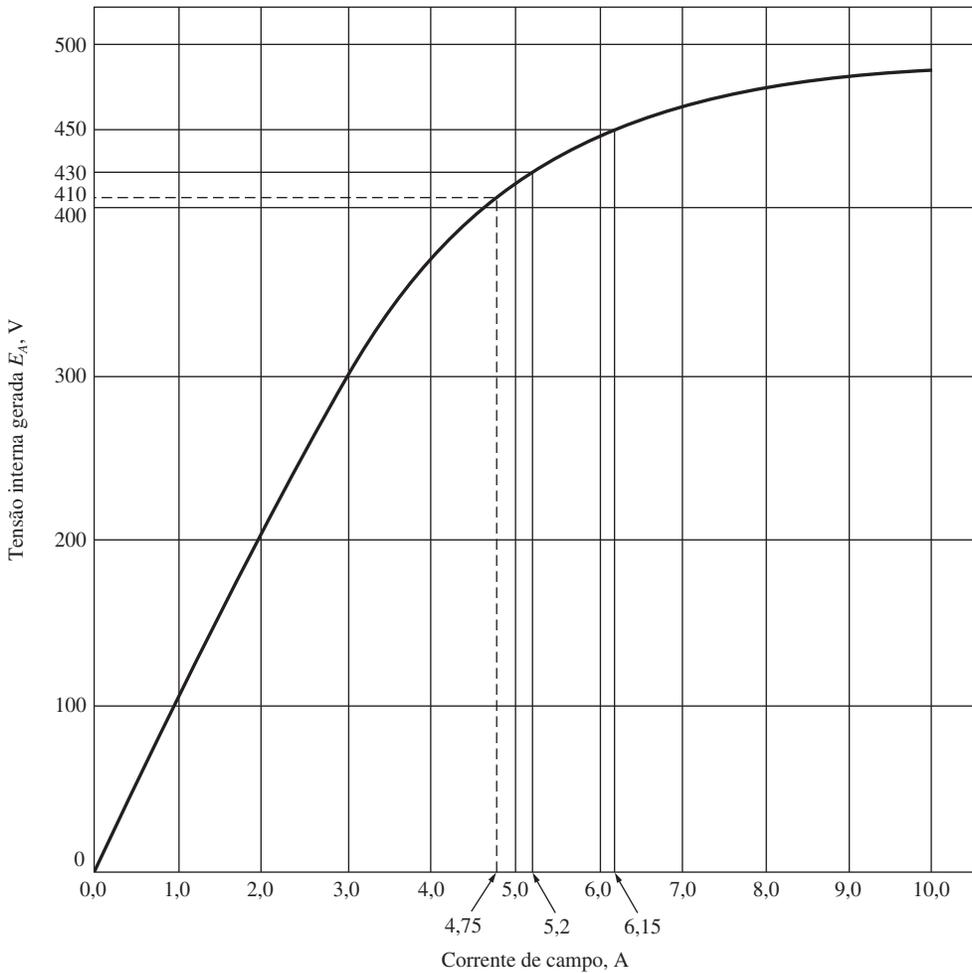
$$R_F + R_{aj} = 83 \, \Omega$$

então a corrente de campo da máquina será

$$I_F = \frac{V_F}{R_F} = \frac{430 \, \text{V}}{83 \, \Omega} = 5,2 \, \text{A}$$

Da curva de magnetização da máquina, vemos que o total de corrente produziria uma tensão $E_{A0} = 430 \, \text{V}$ na velocidade de 1800 rpm. Como esse gerador está na realidade girando a $n_m = 1600 \, \text{rpm}$, sua tensão interna gerada E_A é

$$\frac{E_A}{E_{A0}} = \frac{n_m}{n_0} \quad (8-13)$$



Nota: Quando a corrente de campo é zero, E_A é aproximadamente 3 V.

FIGURA 8-48

A curva de magnetização do gerador do Exemplo 4-9.

$$E_A = \frac{1600 \text{ rpm}}{1800 \text{ rpm}} 430 \text{ V} = 382 \text{ V}$$

Como a vazio temos $V_T = E_A$, a tensão de saída do gerador é $V_T = 382 \text{ V}$.

(b) Se uma carga de 360 A fosse conectada aos terminais desse gerador, a tensão de terminal do gerador seria

$$V_T = E_A - I_A R_A = 382 \text{ V} - (360 \text{ A})(0,05 \Omega) = 364 \text{ V}$$

(c) Se uma carga de 360 A fosse conectada aos terminais desse gerador e o gerador tivesse 450 A • e de reação de armadura, a corrente de campo efetiva seria

$$I_F^* = I_F - \frac{\mathcal{F}_{RA}}{N_F} = 5,2 \text{ A} - \frac{450 \text{ A} \cdot e}{1000 e} = 4,75 \text{ A}$$

Da curva de magnetização, vemos que $E_{A0} = 410$ V, de modo que a tensão interna gerada para $n_m = 1600$ rpm seria

$$\frac{E_A}{E_{A0}} = \frac{n}{n_0} \quad (8-13)$$

$$E_A = \frac{1600 \text{ rpm}}{1800 \text{ rpm}} 410 \text{ V} = 364 \text{ V}$$

Portanto, a tensão de terminal do gerador seria

$$V_T = E_A - I_A R_A = 364 \text{ V} = (360 \text{ A})(0,05 \Omega) = 346 \text{ V}$$

Ela é menor do que antes devido à reação de armadura.

- (d) A tensão nos terminais do gerador caiu, de modo que a tensão do gerador deve ser aumentada para que ela volte ao seu valor original. Isso requer um aumento em E_A , o que implica uma diminuição em R_{aj} para que a corrente de campo do gerador seja incrementada.
- (e) Para que a tensão de terminal volte a 382 V, o valor requerido de E_A é

$$E_A = V_T + I_A R_A = 382 \text{ V} = (360 \text{ A})(0,05 \Omega) = 400 \text{ V}$$

Para obter uma tensão E_A de 400 V para $n_m = 1600$ rpm, a tensão equivalente para 1800 rpm seria

$$\frac{E_A}{E_{A0}} = \frac{n_m}{n_0} \quad (8-13)$$

$$E_{A0} = \frac{1800 \text{ rpm}}{1600 \text{ rpm}} 400 \text{ V} = 450 \text{ V}$$

Da curva de magnetização, vemos que essa tensão exigiria uma corrente de campo de $I_F = 6,15$ A. A resistência do circuito de campo teria de ser

$$R_F + R_{aj} = \frac{V_F}{I_F}$$

$$20 \Omega + R_{aj} = \frac{430 \text{ V}}{6,15 \text{ A}} = 69,9 \Omega$$

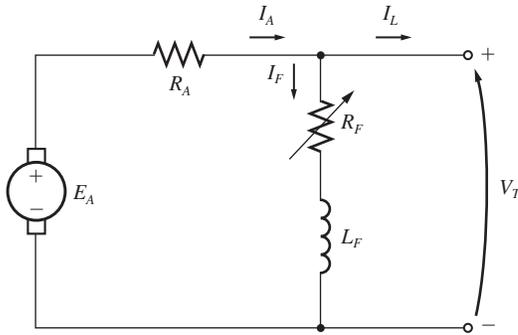
$$R_{aj} = 49,9 \Omega \approx 50 \Omega$$

Observe que, para as mesmas correntes de campo e de carga, o gerador com reação de armadura tem uma tensão de saída menor do que o gerador sem reação de armadura. A reação de armadura desse gerador foi exagerada para ilustrar seus efeitos – ela é bem menor nas máquinas modernas bem projetadas.

8.13 O GERADOR CC EM DERIVAÇÃO

Um gerador CC em derivação é um gerador CC que produz sua própria corrente de campo conectando seu campo diretamente aos terminais da máquina. O circuito equivalente de um gerador CC em derivação está mostrado na Figura 8-49. Nesse circuito, a corrente de armadura da máquina alimenta ambos, o circuito de campo e a carga ligada à máquina:

$$I_A = I_F + I_L \quad (8-44)$$



$$I_A = I_F + I_L$$

$$V_T = E_A - I_A R_A$$

$$I_F = \frac{V_T}{R_F}$$

FIGURA 8-49
O circuito equivalente de um gerador CC em derivação.

A equação da lei de Kirchhoff das tensões para o circuito de armadura dessa máquina é

$$V_T = E_A - I_A R_A \tag{8-45}$$

Esse tipo de gerador tem uma vantagem evidente sobre o gerador CC de excitação independente porque não há necessidade de uma fonte de alimentação externa para o circuito de campo. No entanto, isso deixa uma questão importante sem resposta: se o gerador supre a sua própria corrente de campo, de que forma ele obtém o fluxo inicial de campo necessário no início quando é dada a partida?

Geração inicial da tensão em um gerador CC em derivação

Assuma que não há carga ligada ao gerador da Figura 8-49 e que a máquina motriz começa a por em rotação o eixo do gerador. Como é gerada uma tensão inicial nos terminais da máquina?

A produção inicial de uma tensão em um gerador CC depende da presença de um *fluxo residual* nos polos do gerador. Inicialmente, quando um gerador começa a girar, uma tensão interna será induzida, sendo dada por

$$E_A = K\phi_{\text{res}}\omega_m$$

Essa tensão surge nos terminais do gerador (pode ser apenas um ou dois volts). No entanto, quando isso ocorre, essa tensão faz circular uma corrente na bobina de campo do gerador ($I_F = V_T \hat{=} / R_F$). Essa corrente de campo produz uma força magnetomotriz nos polos, aumentando o fluxo neles. O incremento de fluxo causa um aumento em $E_A = K\phi \hat{=} \omega_m$, o que aumenta a tensão de terminal V_T . Quando V_T sobe, I_F cresce ainda mais, aumentando o fluxo ω , o que aumenta E_A , etc.

Esse comportamento da geração inicial de tensão, denominado *escorvamento*, está mostrado na Figura 8-50. Observe que, no final, é o efeito da saturação magnética das faces polares que impede o crescimento contínuo da tensão de terminal do gerador.

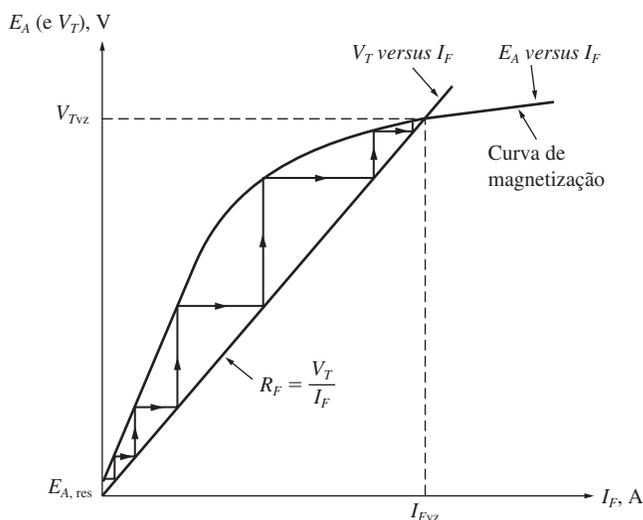


FIGURA 8-50

Geração da tensão inicial, ou escorvamento, na partida de um gerador CC em derivação.

A Figura 8-50 mostra a geração inicial da tensão como se ocorresse em degraus discretos. Esses degraus foram desenhados para tornar óbvia a realimentação positiva entre a tensão interna do gerador e sua corrente de campo. Em um gerador real, a tensão inicial não é produzida em degraus discretos: em vez disso, E_A e I_F aumentam simultaneamente até que as condições de regime permanente sejam atingidas.

Na partida, que acontece se um gerador em derivação arranca e nenhuma tensão inicial é produzida? Que poderia estar errado? Há diversas causas possíveis para que a tensão inicial não seja produzida durante a partida. Entre elas, estão

1. *Pode não haver fluxo magnético residual* no gerador. Isso impedirá que o processo de escorvamento tenha início. Se o fluxo residual for $\phi_{res} = 0$, então teremos $E_A = 0$ e a tensão nunca começará a ser produzida. Se ocorrer esse problema, desligue o campo do circuito de armadura e conecte-o diretamente a uma fonte CC externa, tal como uma bateria. O fluxo de corrente dessa fonte CC deixará um fluxo residual nos polos, possibilitando então uma partida normal. Portanto, esse procedimento consiste em aplicar diretamente ao campo uma corrente CC durante um breve período de tempo.
2. *Pode ter ocorrido uma inversão do sentido de rotação do gerador* ou pode ter havido uma inversão nas ligações do campo. Em ambos os casos, o fluxo residual ainda gera uma tensão interna E_A . Essa tensão produz uma corrente de campo que, por sua vez, induz um fluxo tal que, em vez de se somar, se *opõe* ao fluxo residual. Nessas circunstâncias, o fluxo resultante *diminuirá* de intensidade, ficando na realidade abaixo de ϕ_{res} sem induzir nenhuma tensão.

Se esse problema ocorrer, ele poderá ser corrigido invertendo o sentido de rotação, invertendo as ligações, ou ainda aplicando brevemente ao campo uma corrente CC tal que inverta a polaridade magnética.

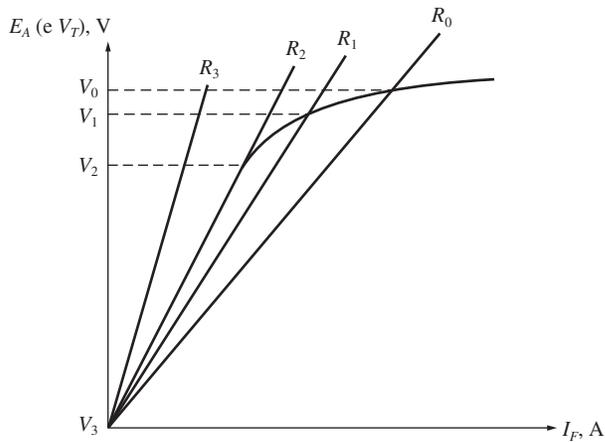


FIGURA 8-51

O efeito da resistência de campo em derivação sobre a tensão de terminal a vazio em um gerador CC. Se $R_F > R_2$ (a resistência crítica), nunca haverá produção de tensão no gerador.

3. O valor da resistência de campo pode ser ajustado para um valor maior do que o da resistência crítica. Para compreender esse problema, consulte Figura 8-51. Normalmente, a tensão inicial do gerador em derivação subirá até o ponto onde a curva de magnetização intersecta a reta da resistência de campo. Se essa resistência de campo tiver o valor R_2 da figura, sua reta será aproximadamente paralela à curva de magnetização. Nesse caso, a tensão do gerador poderá flutuar amplamente com apenas mínimas alterações de R_F ou I_A . Esse valor de resistência é denominado *resistência crítica*. Se R_F exceder a resistência crítica (como em R_3 na figura), a tensão de operação de regime permanente ocorrerá basicamente em nível residual e nunca subirá. A solução para esse problema está em reduzir R_F .

Como a tensão da curva de magnetização varia em função da velocidade do eixo, a resistência crítica também variará com a velocidade. Em geral, quanto menor for a velocidade do eixo, menor será a resistência crítica.

A característica de terminal de um gerador CC em derivação

A característica de terminal de um gerador CC em derivação é diferente da de um gerador de excitação independente, porque a corrente de campo da máquina depende de sua tensão de terminal. Para compreender a característica de terminal de um gerador em derivação, comece com a máquina a vazio e adicione carga, observando o que acontece.

À medida que a carga do gerador aumenta, I_L cresce e, portanto, $I_A = I_F + I_L$ também cresce. Uma elevação de I_A aumenta a queda de tensão $I_A R_A$ na resistência de armadura, fazendo $V_T = E_A - I_A R_A$ diminuir. Esse comportamento é precisamente o mesmo observado em um gerador de excitação independente. Entretanto, quando V_T diminui, a corrente de campo da máquina diminui junto. Isso faz o fluxo da má-

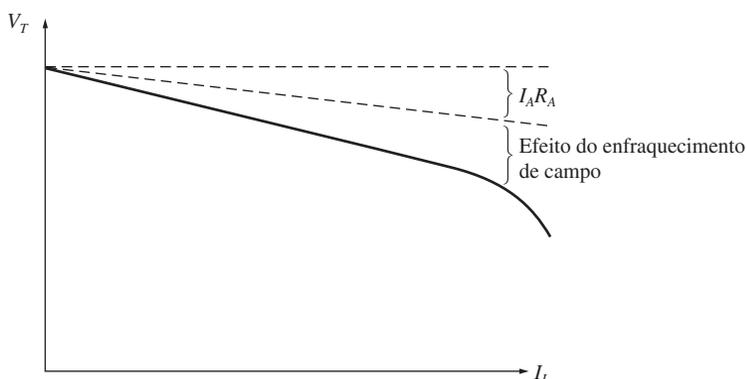


FIGURA 8-52

A característica de terminal de um gerador CC em derivação.

quina diminuir, reduzindo também E_A . A queda em E_A causa uma nova diminuição na tensão de terminal $V_T = E_A \downarrow - I_A R_A$. A característica de terminal resultante está mostrada na Figura 8-52. Observe que a queda de tensão é mais acentuada do que simplesmente a queda $I_A R_A$ do gerador de excitação independente. Em outras palavras, a regulação de tensão desse gerador é pior do que a do mesmo tipo de equipamento em que a excitação é conectada em separado.

Controle da tensão de um gerador CC em derivação

Como no gerador de excitação independente, há dois modos para controlar a tensão de um gerador CC em derivação:

1. Alterar a velocidade do eixo ω_m do gerador.
2. Alterar a resistência de campo do gerador, variando assim a corrente de campo.

A variação da resistência de campo é o método principal usado para controlar a tensão de terminal dos geradores em derivação reais. Se resistência de campo R_F for diminuída, então a corrente de campo $I_F = V_T / R_F \downarrow$ subirá. Quando I_F aumenta, o fluxo da máquina ϕ também sobe, fazendo a tensão interna gerada E_A aumentar. O incremento em E_A faz com que a tensão de terminal do gerador também aumente.

Análise não linear de um gerador CC em derivação

A análise de um gerador CC em derivação é mais complexa do que a análise de um gerador de excitação independente, porque a corrente de campo da máquina depende diretamente da própria tensão de saída da máquina. Primeiro, a análise é feita para máquinas sem reação de armadura e, depois, os efeitos da reação de armadura são incluídos.

A Figura 8-53 mostra uma curva de magnetização para um gerador CC em derivação desenhada para a velocidade real de funcionamento da máquina. A resistência

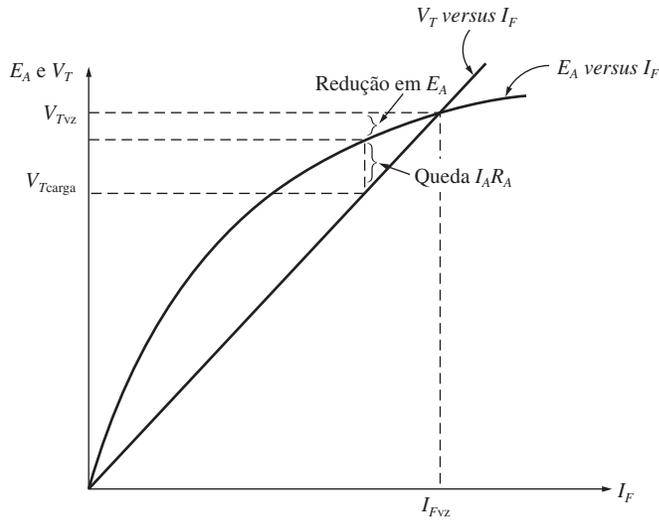


FIGURA 8-53
Análise gráfica de um gerador CC em derivação com enrolamentos de compensação.

de campo R_F , que é simplesmente igual a V_T/I_F , é a linha reta sobreposta à curva de magnetização. A *vazio*, temos $V_T = E_A$ e o gerador opera na tensão em que a curva de magnetização intersecta a reta de resistência de campo.

A chave para compreender a análise gráfica dos geradores em derivação é lembrar a lei de Kirchhoff das tensões (LKT):

$$V_T = E_A - I_A R_A \tag{8-45}$$

ou

$$E_A - V_T = I_A R_A \tag{8-46}$$

A diferença entre a tensão interna gerada e a tensão de terminal é simplesmente a queda $I_A R_A$ da máquina. A linha com todos os valores possíveis de E_A é a curva de magnetização e a linha com todos as tensões possíveis de terminal é a reta de resistência ($I_F = V_T/R_F$). Portanto, para encontrar a tensão de terminal para uma dada carga, simplesmente determine a queda $I_A R_A$ e localize no gráfico o lugar onde essa queda se encaixa *exatamente* entre a curva E_A e a reta V_T . Há no máximo dois lugares na curva onde a queda $I_A R_A$ irá se encaixar exatamente. Se houver dois locais possíveis, o que estiver mais próximo da tensão a *vazio* representará um ponto de funcionamento normal.

Na Figura 8-54, temos um gráfico detalhado que mostra diversos pontos da característica de um gerador em derivação. Observe a curva tracejada da Figura 8-54b. Essa curva é a característica de terminal quando a carga foi reduzida. A razão de ela não coincidir com a curva de carga maior é a histerese que está presente nos polos do gerador.

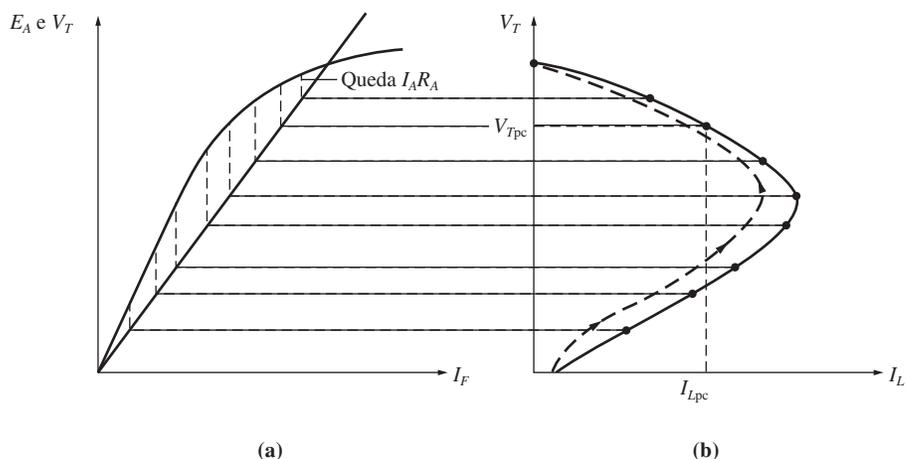


FIGURA 8-54
Obtenção gráfica da característica de terminal de um gerador CC em derivação.

Se houver reação de armadura presente em um gerador CC em derivação, esse processo irá se tornar um pouco mais complicado. A reação de armadura produz uma força magnetomotriz desmagnetizante no gerador ao mesmo tempo que ocorre uma queda $I_A R_A$ na máquina.

Para analisar um gerador com reação de armadura, assumamos que sua corrente de armadura é conhecida. Então, a queda de tensão resistiva $I_A R_A$ será conhecida. A tensão de terminal desse gerador deve ser suficientemente elevada para suprir o fluxo do gerador *depois que o efeito desmagnetizante da reação de armadura foi subtraído*. Para atender essa exigência, a força magnetomotriz da reação de armadura e a queda $I_A R_A$ devem se encaixar entre a curva E_A e a reta V_T . Para determinar a tensão de saída correspondente a uma dada força magnetomotriz, simplesmente localize o lugar abaixo da curva de magnetização onde o triângulo formado pelos efeitos da reação de armadura e de $I_A R_A$ *encaixam-se exatamente* entre a reta de possíveis valores de V_T e a curva de possíveis valores de E_A (Figura 8-55).

8.14 O GERADOR CC SÉRIE

Um gerador CC série é um gerador cujo campo está ligado em série com sua armadura. Como a corrente de armadura é *muito* maior do que a de um campo em derivação, o campo em série de um gerador desse tipo terá apenas poucas espiras de fio, sendo que o fio usado será muito mais espesso do que o fio de um campo em derivação. Como a força magnetomotriz é dada pela equação $\mathcal{F} = NI$, exatamente a mesma força magnetomotriz poderá ser produzida usando poucas espiras e uma corrente elevada ou usando muitas espiras e uma corrente baixa. Como a corrente de plena carga circula pelo campo, deve-se projetar esse campo em série para ter a menor resistência possível. O circuito equivalente de um gerador CC série está mostrado na Figura 8-56. Aqui, a corrente de armadura, a corrente de campo e a

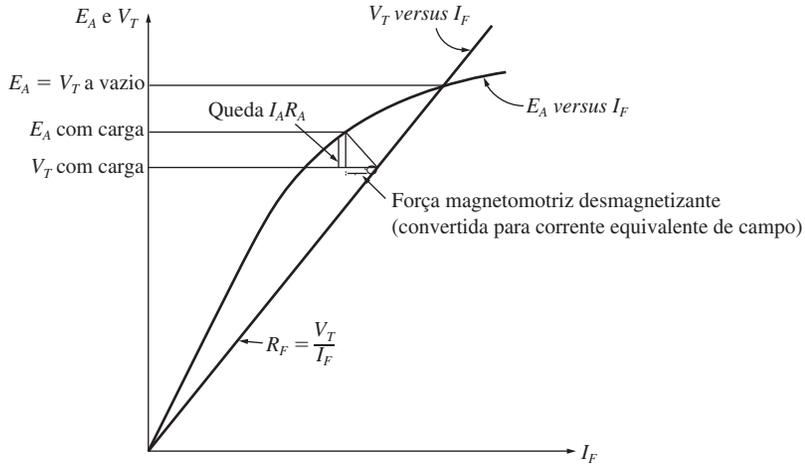


FIGURA 8-55
Análise gráfica de um gerador CC em derivação com reação de armadura.

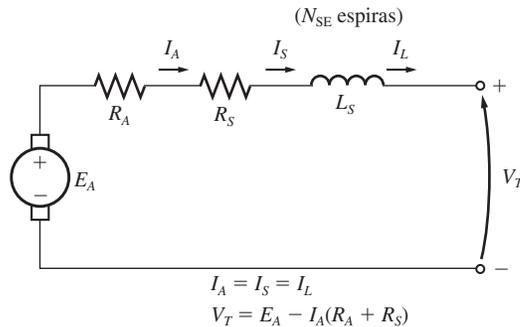


FIGURA 8-56
O circuito equivalente de um gerador CC série.

corrente de linha têm todas o mesmo valor. A lei de Kirchhoff das tensões para essa máquina é

$$V_T = E_A - I_A(R_A + R_S) \tag{8-47}$$

A característica de terminal de um gerador CC série

A curva de magnetização de um gerador CC série assemelha-se muito à curva de magnetização de qualquer outro gerador. A vazio, entretanto, não há corrente de campo, de modo que V_T reduz-se a um nível bem baixo dado pelo fluxo residual presente na máquina. À medida que a carga cresce, a corrente de campo sobe, de modo que E_A eleva-se rapidamente. A queda $I_A(R_A + R_S)$ aumenta também, mas inicialmente o aumento de E_A dá-se mais rapidamente do que o aumento na queda $I_A(R_A + R_S)$ e

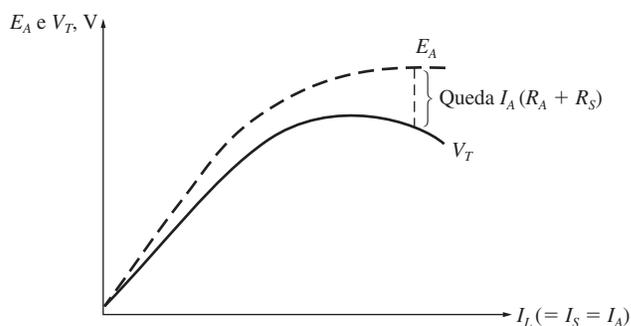


FIGURA 8-57

Obtenção da característica de terminal de um gerador CC série.

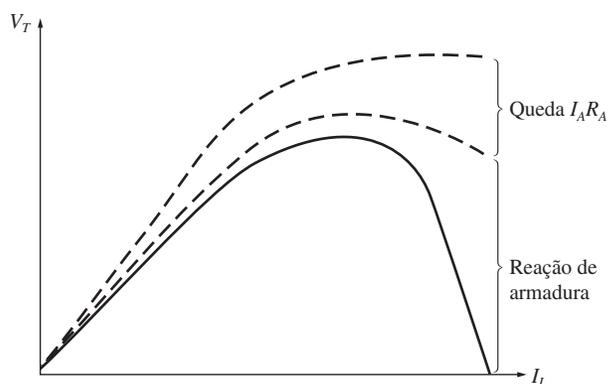


FIGURA 8-58

A característica de terminal de um gerador série, com grandes efeitos de reação de armadura, adequado para solda elétrica a arco.

consequentemente V_T sobe. Depois de um tempo, a máquina aproxima-se da saturação e E_A torna-se quase constante. Nesse ponto, a queda resistiva passa a ser o efeito predominante e V_T começa a cair.

Esse tipo de característica está mostrado na Figura 8-57. É óbvio que essa máquina se mostraria como uma fonte de tensão constante bem ruim. De fato, sua regulação de tensão é um número elevado negativo.

Os geradores em série são usados apenas em algumas poucas aplicações especializadas, nas quais a característica de queda acentuada de tensão do dispositivo pode ser explorada. Uma dessas aplicações é a soldagem a arco elétrico. Os geradores em série usados na soldagem a arco são projetados intencionalmente para ter uma reação de armadura elevada, o que lhes dá a característica de terminal como a mostrada na Figura 8-58. Observe que, quando os eletrodos de soldagem fazem contato entre si antes que se inicie propriamente a soldagem, uma corrente muito elevada circula. Quando o soldador afasta os eletrodos, há uma elevação muito acentuada na tensão do gerador, ao passo que a corrente permanece elevada. Essa tensão assegura que um arco de soldagem seja mantido através do ar entre os eletrodos.

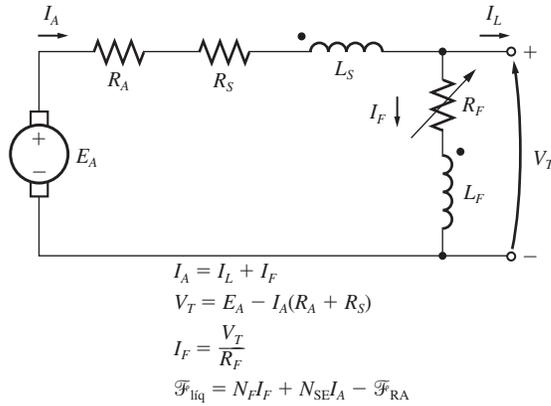


FIGURA 8-59
O circuito equivalente de gerador CC composto cumulativo com uma ligação em derivação longa.

8.15 O GERADOR CC COMPOSTO CUMULATIVO

Um gerador CC composto cumulativo é um gerador CC que tem *os campos em série e em derivação* conectados de tal forma que as forças magnetomotrizes dos dois adicionam-se. A Figura 8-59 mostra o circuito equivalente de um gerador CC composto cumulativo na conexão de “derivação longa”. Os pontos ou marcas que aparecem nas duas bobinas de campo têm o mesmo significado que os pontos em um transformador: *a corrente que entra pela extremidade com ponto da bobina produz uma força magnetomotriz positiva*. Observe que a corrente de armadura entra pela extremidade com ponto da bobina de campo em série e que a corrente I_F de derivação entra pela extremidade com ponto da bobina de campo em derivação. Portanto, a força magnetomotriz total nessa máquina é dada por

$$\mathcal{F}_{\text{liq}} = \mathcal{F}_F + \mathcal{F}_{SE} - \mathcal{F}_{RA} \tag{8-48}$$

em que \mathcal{F}_F é a força magnetomotriz do campo em derivação, \mathcal{F}_{SE} é a força magnetomotriz do campo em série e \mathcal{F}_{RA} é a força magnetomotriz da reação de armadura. A corrente equivalente efetiva do campo em derivação para essa máquina é dada por

$$N_F I_F^* = N_F I_F + N_{SE} I_A = \mathcal{F}_{RA}$$

$$I_F^* = I_F + \frac{N_{SE}}{N_F} I_A - \frac{\mathcal{F}_{RA}}{N_F} \tag{8-49}$$

As outras relações de tensão e corrente para esse gerador são

$$I_A = I_F + I_L \tag{8-50}$$

$$V_T = E_A - I_A(R_A + R_S) \tag{8-51}$$

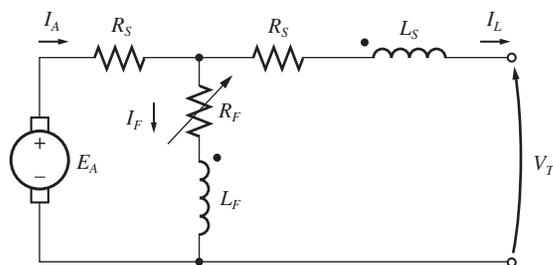


FIGURA 8-60

O circuito equivalente de gerador CC composto cumulativo com uma ligação em derivação curta.

$$I_F = \frac{V_T}{R_F} \quad (8-52)$$

Há outro modo de configurar as ligações de um gerador CC composto cumulativo. Trata-se da conexão “em derivação curta”, na qual o campo em série fica fora do circuito de campo em derivação e tem a corrente I_L circulando por ele em vez de I_A . Um gerador CC composto cumulativo em derivação curta está mostrado na Figura 8-60.

A característica de terminal de um gerador CC composto cumulativo

Para compreender a característica de terminal de um gerador CC composto cumulativo, é necessário compreender os efeitos simultâneos que ocorrem dentro da máquina.

Suponha que a carga do gerador seja aumentada. Então, à medida que a carga sobe, a corrente de carga I_L sobe. Como $I_A = I_F + I_L \uparrow$, a corrente de armadura também aumenta. Nesse ponto, ocorrem dois efeitos no gerador:

1. Quando I_A aumenta, a queda de tensão $I_A(R_A + R_S)$ também aumenta. Isso tende a causar uma diminuição na tensão de terminal $V_T = E_A - I_A \uparrow (R_A + R_S)$.
2. Quando I_A aumenta, a força magnetomotriz do campo em série $\mathcal{F}_{SE} = N_{SE} I_A$ também aumenta. Isso incrementa a força magnetomotriz total $\mathcal{F}_{tot} = N_F I_F + N_{SE} I_A \uparrow$, o que incrementa o fluxo no gerador. Esse fluxo aumentado no gerador faz E_A subir, o que por sua vez tende a elevar $V_T = E_A \uparrow - I_A(R_A + R_S)$.

Esses dois efeitos opõem-se entre si, com um tendendo a *eleva*r V_T e o outro tendendo a *baixa*r V_T . Qual efeito será predominante em uma dada máquina? Tudo dependerá de quantas espiras em série forem colocadas nos polos da máquina. A questão pode ser respondida examinando diversos casos individuais:

1. *Poucas espiras em série* (N_{SE} pequeno). Se houver apenas poucas espiras, o efeito da queda de tensão resistiva facilmente prevalece. A tensão cai exatamente como em um gerador em derivação, mas não tão acentuadamente (Figura

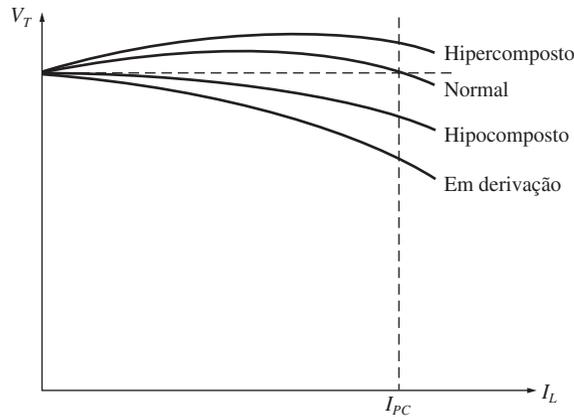


FIGURA 8-61
Característica de terminal de geradores CC compostos cumulativos.

8-61). Esse tipo de configuração, em que a tensão de terminal a plena carga é menor do que a tensão de terminal a vazio, é denominado *hipocomposto*.

2. *Mais espiras em série (N_{SE} maior)*. Quando há algumas espiras a mais nos polos, inicialmente, o efeito do reforço de fluxo prevalece e a tensão de terminal aumenta com a carga. Entretanto, à medida que a carga continua aumentando, tem início a saturação magnética e a queda de tensão resistiva supera o efeito do aumento de fluxo. Nessa máquina, *inicialmente a tensão de terminal sobe e em seguida cai à medida que a carga aumenta*. Se V_T a vazio for igual a V_T a plena carga, então o gerador será denominado *normal*.
3. *Ainda mais espiras em série são acrescentadas (N_{SE} grande)*. Se ainda mais espiras em série forem acrescentadas ao gerador, então o efeito do reforço de fluxo estará prevalecendo em uma faixa maior ainda, antes que a queda de tensão resistiva passe a predominar. O resultado é uma característica na qual a tensão de terminal de plena carga é mais elevada na realidade do que a tensão de terminal a vazio. Se a tensão V_T de plena carga exceder V_T a vazio, então o gerador será denominado *hipercomposto*.

Todas essas possibilidades estão ilustradas na Figura 8-61.

Também é possível dispor de todas essas características de tensão em um *único gerador* se um resistor desviador for usado. A Figura 8-62 mostra um gerador CC composto cumulativo com um número relativamente grande de espiras em série N_{SE} . Um resistor desviador de corrente, denominado resistor de drenagem, é ligado em paralelo com o campo em série. Se o resistor de drenagem R_d for ajustado para um valor elevado, a maior parte da corrente de armadura circulará através da bobina do campo em série e o gerador será hipercomposto. Por outro lado, se o resistor R_d for ajustado para um valor pequeno, então a maior parte da corrente circulará através de R_d , paralelamente ao campo em série, e o gerador será hipocomposto. O resistor pode ser ajustado de forma contínua, permitindo obter qualquer combinação desejada.

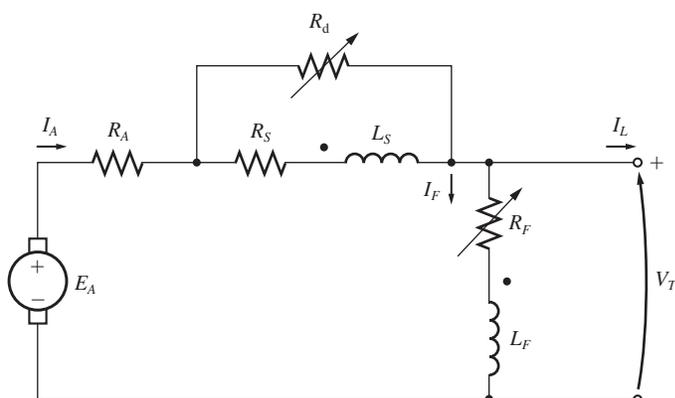


FIGURA 8-62

Um gerador CC composto cumulativo com um resistor de drenagem para desviar a corrente do campo em série.

Controle da tensão de um gerador CC composto cumulativo

As técnicas disponíveis para o controle da tensão de terminal de um gerador CC composto cumulativo são exatamente as mesmas técnicas usadas para o controle da tensão de um gerador CC em derivação:

1. Variar a velocidade de rotação. Um incremento em ω faz $E_A = K\phi\omega_m \uparrow$ aumentar, o que eleva a tensão de terminal $V_T = E_A \uparrow - I_A(R_A + R_S)$.
2. Variar a corrente de campo. Uma diminuição em R_F faz $I_F = V_T/R_F \downarrow$ aumentar, o que eleva a força magnetomotriz total do gerador. Quando \mathcal{F}_{tot} sobe, o fluxo ϕ da máquina aumenta, o que eleva $E_A = K\phi \uparrow \omega_m$. Finalmente, um aumento em E_A faz V_T subir.

Análise de um gerador CC composto cumulativo

As Equações (8-53) e (8-54) são a chave da descrição da característica de terminal de um gerador CC composto cumulativo. A corrente equivalente de campo em derivação I_{eq} , devido aos efeitos do campo em série e da reação de armadura, é dada por

$$I_{\text{eq}} = \frac{N_{\text{SE}}}{N_F} I_A - \frac{\mathcal{F}_{\text{RA}}}{N_F} \quad (8-53)$$

Portanto, a corrente efetiva total de campo em derivação da máquina é

$$I_F^* = I_F + I_{\text{eq}} \quad (8-53)$$

Essa corrente equivalente I_{eq} corresponde a uma distância horizontal à esquerda ou à direita da reta da resistência de campo ($R_F = V_T/I_F$) ao longo dos eixos da curva de magnetização.

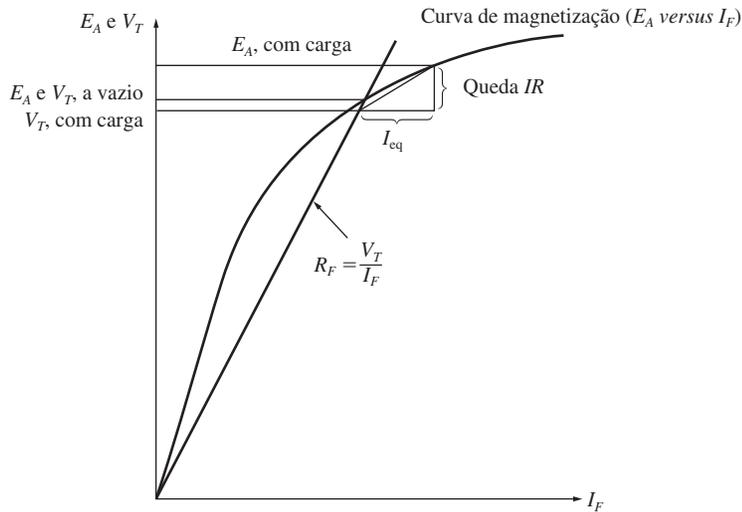


FIGURA 8-63
Análise gráfica de um gerador CC composto cumulativo.

A queda resistiva do gerador é dada por $I_A(R_A + R_S)$, o que é um comprimento sobre o eixo vertical da curva de magnetização. Tanto a corrente equivalente I_{eq} quanto a queda de tensão resistiva $I_A(R_A + R_S)$ dependem do valor da corrente de armadura I_A . Portanto, elas formam os dois lados de um triângulo cujos valores são uma função de I_A . Para obter a tensão de saída, para uma dada carga, determine o tamanho do triângulo e encontre o local onde ele se encaixa *exatamente* entre a reta da corrente de campo e a curva de magnetização.

Essa ideia está ilustrada na Figura 8-63. A tensão de terminal a vazio será o ponto no qual a reta da resistência e a curva de magnetização intersectam-se, como antes. Quando uma carga é acrescentada ao gerador, a força magnetomotriz do campo em série aumenta, elevando a corrente equivalente do campo em derivação I_{eq} e a queda de tensão resistiva $I_A(R_A + R_S)$ da máquina. Para encontrar a nova tensão de saída desse gerador, desloque o vértice, que está mais à esquerda do triângulo, ao longo da reta da corrente do campo em derivação até que o vértice superior do triângulo toque a curva de magnetização. Esse vértice superior representará a tensão interna gerada da máquina, ao passo que a linha inferior representa a tensão de terminal da máquina.

A Figura 8-64 mostra esse processo repetido diversas vezes para construir a característica de terminal completa do gerador.

8.16 O GERADOR CC COMPOSTO DIFERENCIAL

Um gerador CC composto diferencial é um gerador que contém os campos em derivação e em série, mas, dessa vez, *as suas forças magnetomotrizes subtraem-se entre si*. O circuito equivalente de um gerador CC composto diferencial está mostrado na

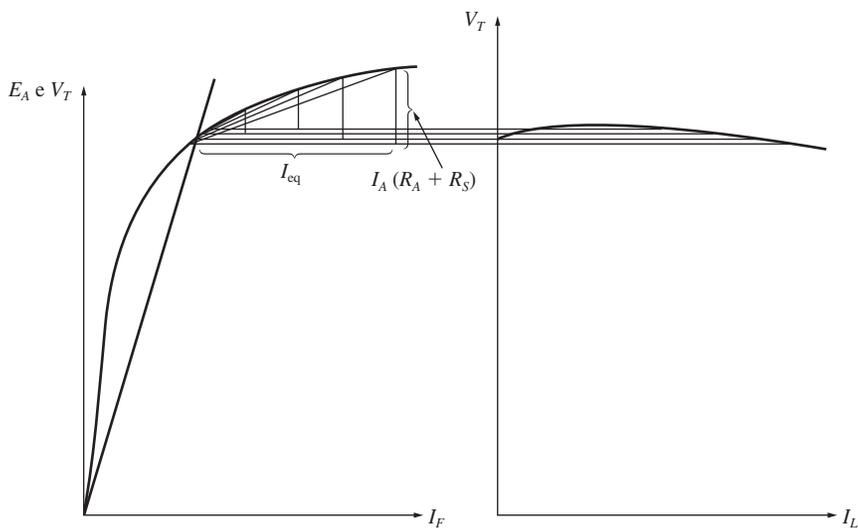


FIGURA 8-64
Obtenção gráfica da característica de terminal de um gerador CC composto cumulativo.

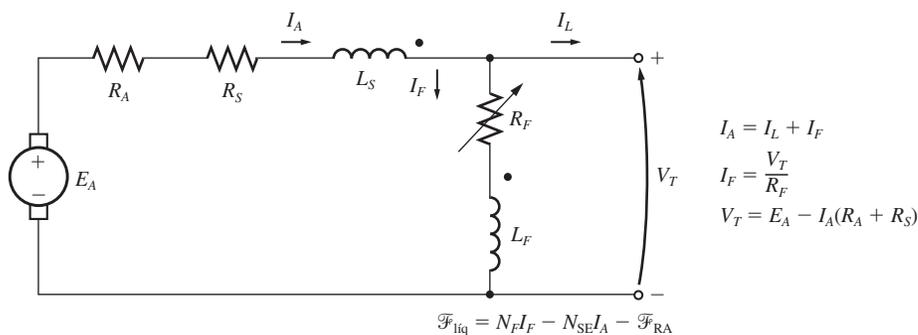


FIGURA 8-65
O circuito equivalente de um gerador CC composto diferencial com uma ligação em derivação longa.

Figura 8-65. Observe que agora a corrente de armadura está circulando para *fora* de uma terminação de bobina com ponto, ao passo que a corrente do campo em derivação está circulando para *dentro* de uma terminação de bobina com ponto. Nessa máquina, a força magnetomotriz líquida é

$$\mathcal{F}_{líq} = \mathcal{F}_F - \mathcal{F}_{SE} - \mathcal{F}_{RA} \tag{8-55}$$

$$\mathcal{F}_{líq} = N_F I_F - N_{SE} I_A - \mathcal{F}_{RA} \tag{8-56}$$

e a corrente equivalente do campo em derivação devido ao campo em série e à reação de armadura é dada por

$$I_{\text{cq}} = -\frac{N_{\text{SE}}}{N_F} I_A - \frac{\mathcal{F}_{\text{RA}}}{N_F} \quad (8-57)$$

A corrente efetiva total do campo em derivação dessa máquina é

$$I_F^* = I_F + I_{\text{cq}} \quad (8-58a)$$

ou

$$I_F^* = I_F - \frac{N_{\text{SE}}}{N_F} I_A - \frac{\mathcal{F}_{\text{RA}}}{N_F} \quad (8-58b)$$

Como o gerador CC composto cumulativo, o gerador CC composto diferencial pode ser ligado em derivação longa ou em derivação curta.

A característica de terminal de um gerador CC composto diferencial

No gerador CC composto diferencial, ocorrem os mesmos dois efeitos que estavam presentes no gerador CC composto cumulativo. Dessa vez, no entanto, ambos os efeitos atuam no mesmo sentido. Eles são

1. Quando I_A aumenta, a queda de tensão $I_A(R_A + R_S)$ também aumenta. Esse aumento tende a diminuir a tensão de terminal $V_T = E_A - I_A \uparrow (R_A + R_S)$.
2. Quando I_A aumenta, a força magnetomotriz do campo em série $\mathcal{F}_{\text{SE}} = N_{\text{SE}} I_A$ também aumenta. Isso *reduz* a força magnetomotriz líquida do gerador ($\mathcal{F}_{\text{tot}} = N_F I_F - N_{\text{SE}} I_A \uparrow$), o que por sua vez reduz o fluxo líquido do gerador. Esse fluxo reduzido diminui E_A , o que por sua vez diminui V_T .

Como ambos os efeitos tendem a *reduzir* V_T , a tensão diminui drasticamente quando a carga é aumentada no gerador. A característica de terminal típica de um gerador CC composto diferencial está mostrada na Figura 8-66.

Controle da tensão de um gerador CC composto diferencial

Mesmo quando as características de queda de tensão de um gerador CC composto diferencial são muito ruins, ainda é possível ajustar a tensão de terminal para qualquer valor dado de carga. As técnicas disponíveis para ajustar a tensão de terminal são exatamente as mesmas que as usadas para os geradores CC compostos em derivação e cumulativo:

1. Variar a velocidade de rotação ω_m .
2. Variar a corrente de campo I_F .

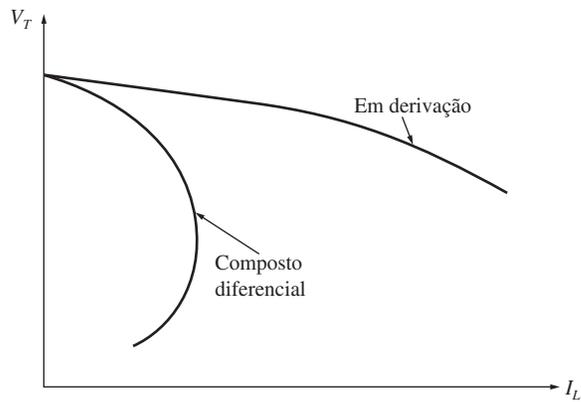


FIGURA 8-66
A característica de terminal de um gerador CC composto diferencial.

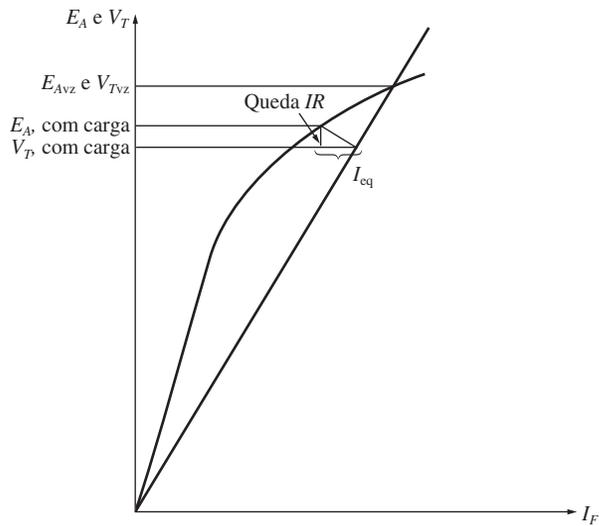


FIGURA 8-67
Análise gráfica de um gerador CC composto diferencial.

Análise gráfica de um gerador CC composto diferencial

A determinação gráfica da característica de tensão de um gerador CC composto diferencial é feita exatamente da mesma forma que a usada para o gerador CC composto cumulativo. Para encontrar a característica de terminal da máquina, consulte a Figura 8-67.

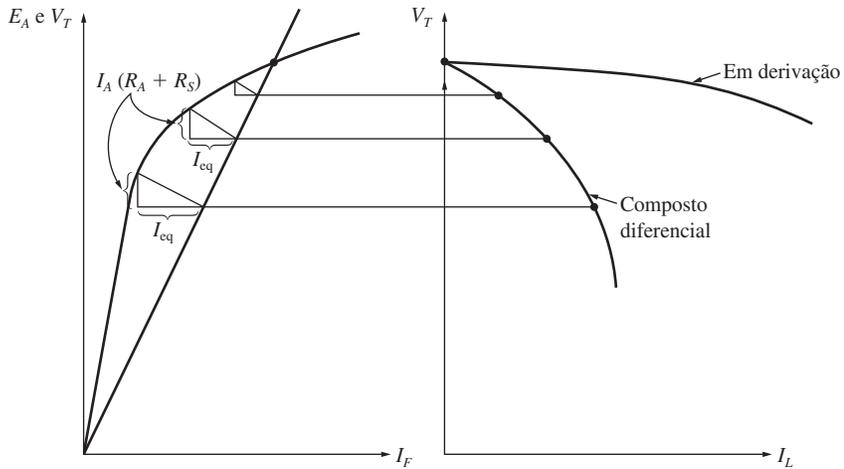


FIGURA 8-68 Construção gráfica da característica de terminal de um gerador CC composto diferencial.

A parte da corrente efetiva de campo em derivação, devido ao campo real em derivação, é sempre igual a V_T/R_F , porque esse é o valor de corrente presente no campo em derivação. O restante da corrente efetiva de campo é dado por I_{eq} e é a soma dos efeitos do campo em série e da reação de armadura. Essa corrente equivalente I_{eq} representa uma distância horizontal *negativa* ao longo dos eixos da curva de magnetização, porque o campo em série e a reação de armadura são subtrativos.

A queda resistiva no gerador é dada por $I_A(R_A + R_S)$, o que corresponde a um comprimento ao longo do eixo vertical da curva de magnetização. Para encontrar a tensão de saída para uma dada carga, comece determinando o tamanho do triângulo formado pela queda de tensão resistiva e a corrente I_{eq} . A seguir, encontre o ponto onde o triângulo encaixa-se *exatamente* entre a reta da corrente de campo e a curva de magnetização.

A Figura 8-68 mostra esse processo sendo repetido diversas vezes na construção da característica de terminal completa do gerador.

8.17 SÍNTESE DO CAPÍTULO

Há muitos tipos de motores CC, que diferem na forma pela qual os seus fluxos de campo são obtidos. Esses tipos de motores são de excitação independente, em derivação, de ímãs permanentes, em série e compostos. A forma de obtenção do fluxo afeta o modo como ele varia com a carga, o que por sua vez afeta a característica total de conjugado *versus* velocidade do motor.

Um motor CC em derivação ou de excitação independente tem uma característica de conjugado *versus* velocidade cuja velocidade cai linearmente com o aumento de conjugado. Sua velocidade pode ser controlada variando sua corrente de campo, sua tensão de armadura ou sua resistência de armadura.

Um motor CC de ímãs permanentes é a mesma máquina básica, exceto pelo fato de que seu fluxo é produzido por ímãs permanentes. Sua velocidade pode ser controlada por qualquer um dos métodos anteriores, menos pela alteração da corrente de campo.

O motor série é o que tem o conjugado de partida mais elevado de todos os motores CC, mas sua velocidade tende a disparar quando a vazio. Ele é usado em aplicações que requerem conjugados muito elevados, nas quais a regulação de velocidade não é importante, como no caso do motor de arranque de um automóvel.

O motor CC composto cumulativo é um meio termo entre os motores série e em derivação, apresentando algumas das melhores características de ambos. Por outro lado, o motor CC composto diferencial é um desastre completo, pois é instável e tende a disparar quando uma carga lhe é adicionada.

Os geradores CC são máquinas CC usadas como geradores. Há diversos tipos diferentes de geradores CC, que diferem no método pelo qual os seus fluxos de campo são obtidos. Esses métodos afetam as características de saída dos diferentes tipos de geradores. Os tipos comuns de geradores CC são os de excitação independente, em derivação, em série, composto cumulativo e composto diferencial.

Os geradores CC em derivação e compostos dependem da não linearidade de suas curvas de magnetização para produzir uma tensão de saída estável. Se a curva de magnetização de uma máquina CC fosse uma linha reta, então a curva de magnetização e a reta da tensão de linha do gerador nunca iriam se cortar. Consequentemente, a vazio, não haveria tensão estável na saída do gerador. Como os efeitos não lineares estão no centro do funcionamento do gerador, as tensões de saída dos geradores CC podem ser determinadas somente por meios gráficos ou numericamente, usando um computador.

Atualmente, em muitas aplicações, os geradores CC foram substituídos por fontes de potência CA e por componentes eletrônicos de estado sólido. Isso é verdadeiro mesmo no caso do automóvel, no qual as fontes CC de potência são usadas mais comumente.

PERGUNTAS

- 8.1 O que é a regulação de velocidade de um motor CC?
- 8.2 Como se pode controlar a velocidade de um motor CC em derivação? Explique detalhadamente.
- 8.3 Na prática, qual é a diferença entre um motor CC de excitação independente e um em derivação?
- 8.4 Que efeito a reação de armadura tem sobre a característica de conjugado *versus* velocidade de um motor CC em derivação? Os efeitos da reação de armadura podem ser sérios? O que se pode fazer para remediar esse problema?
- 8.5 Quais são as características desejáveis dos ímãs permanentes das máquinas CCIP?
- 8.6 Quais são as principais características de um motor CC série? Quais são os seus usos?
- 8.7 Quais são as características de um motor CC composto cumulativo?
- 8.8 Quais são os problemas associados ao motor CC composto diferencial?
- 8.9 O que acontecerá a um motor CC em derivação se o seu circuito de campo abrir enquanto ele estiver em funcionamento?
- 8.10 Por que se usa uma resistência de partida nos circuitos de motores CC?
- 8.11 Como uma resistência de partida CC pode ser removida do circuito de armadura de um motor exatamente no momento certo durante a partida?
- 8.12 O que é o sistema Ward-Leonard de controle de motor? Quais são as suas vantagens e desvantagens?
- 8.13 O que é regeneração?

- 8.14 Quais são as vantagens e desvantagens dos controladores de motor de estado sólido, quando comparados com o sistema Ward-Leonard?
- 8.15 Qual é a finalidade do relé de perda de campo?
- 8.16 Que tipos de circuitos de proteção são incluídos em controladores típicos de estado sólido para motores CC? Como funcionam?
- 8.17 Como se pode inverter o sentido de rotação de um motor CC de excitação independente?
- 8.18 Como se pode inverter o sentido de rotação de um motor CC em derivação?
- 8.19 Como se pode inverter o sentido de rotação de um motor CC série?
- 8.20 Dê o nome e descreva as características dos cinco tipos de geradores estudados neste capítulo.
- 8.21 Como ocorre a geração inicial de tensão em um gerador CC em derivação durante a partida?
- 8.22 O que poderia impedir que a geração inicial de tensão ocorresse durante a partida? Como se pode remediar esse problema?
- 8.23 De que forma a reação de armadura afeta a tensão de saída em um gerador de excitação independente?
- 8.24 O que causa a queda extraordinariamente rápida da tensão com o aumento da carga em um gerador CC composto diferencial?

PROBLEMAS

Os Problemas 8-1 a 8-12 referem-se ao seguinte motor CC:

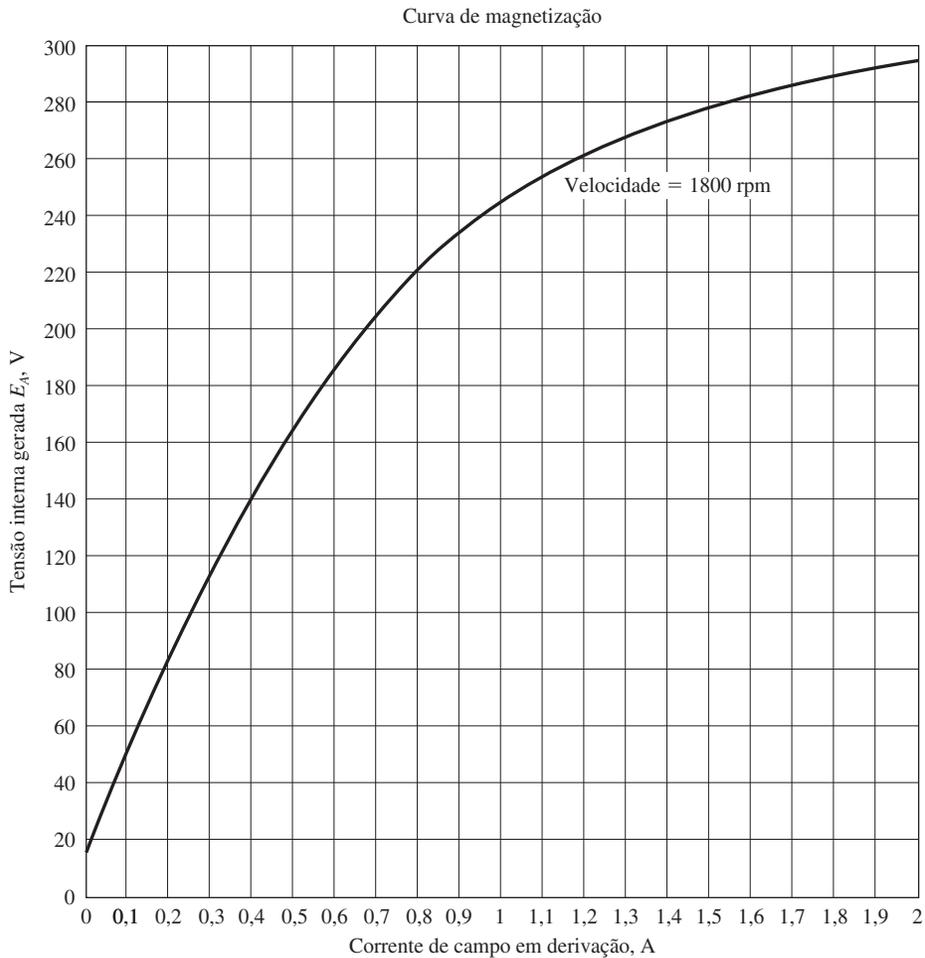
$P_{\text{nominal}} = 30 \text{ HP}$	$I_{L, \text{nominal}} = 110 \text{ A}$
$V_T = 240 \text{ V}$	$N_F = 2700 \text{ espiras por polo}$
$n_{\text{nominal}} = 1800 \text{ rpm}$	$N_{SE} = 14 \text{ espiras por polo}$
$R_A = 0.19 \ \Omega$	$R_F = 75 \ \Omega$
$R_S = 0.02 \ \Omega$	$R_{aj} = 100 \text{ a } 400 \ \Omega$

Perdas rotacionais = 3550 W a plena carga.

Curva de magnetização como a mostrada na Figura P8-1.

Nos Problemas 8-1 a 8-7, assuma que o motor pode ser ligado em derivação. O circuito equivalente do motor em derivação está mostrado na Figura P8-2.

- 8.1 Se o resistor R_{aj} for ajustado para $175 \ \Omega$, qual será a velocidade de rotação do motor a vazio?
- 8.2 Assumindo que não há reação de armadura, qual é a velocidade do motor a plena carga? Qual é a regulação de velocidade do motor?
- 8.3 Se o motor estiver operando a plena carga e se sua resistência variável R_{aj} for aumentada para $250 \ \Omega$, qual será a nova velocidade do motor? Compare a velocidade de plena carga do motor, para $R_{aj} = 175 \ \Omega$, com a velocidade de plena carga para $R_{aj} = 250 \ \Omega$. (Assuma que não há reação de armadura, como no problema anterior.)
- 8.4 Assuma que o motor está funcionando a plena carga e que o resistor variável R_{aj} é novamente $175 \ \Omega$. Se a reação de armadura for $1000 \text{ A} \cdot \text{e}$ a plena carga, qual será a velocidade do motor? Como esse resultado compara-se com o do Problema 8-2?
- 8.5 Se o resistor R_{aj} puder se ajustado de $100 \text{ a } 400 \ \Omega$, quais serão as velocidades a vazio máxima e mínima obtidas com esse motor?
- 8.6 Qual será a corrente de partida dessa máquina se sua partida for feita ligando-a diretamente à fonte de potência V_T ? Como essa corrente de partida compara-se com a corrente de plena carga do motor?

**FIGURA P8-1**

A curva de magnetização do motor CC dos Problemas 8-1 a 8-12. Essa curva foi feita com uma velocidade constante de 1800 rpm.

- 8.7** Plote a característica de conjugado *versus* velocidade desse motor assumindo que não há reação de armadura e, novamente, assumindo uma reação de armadura de plena carga de $1200 \text{ A} \cdot \text{e}$. (Assuma que a reação de armadura cresce linearmente com o aumento de corrente de armadura.)

Nos Problemas 8-8 e 8-9, as ligações do motor CC em derivação são refeitas e o motor torna-se de excitação independente, como está mostrado na Figura P8-3. Ele tem uma tensão de campo fixa V_F de 240 V e uma tensão de armadura V_A que pode ser variada de 120 a 240 V.

- 8.8** Qual é a velocidade a vazio desse motor de excitação independente quando $R_{aj} = 175 \Omega$ e (a) $V_A = 120 \text{ V}$, (b) $V_A = 180 \text{ V}$ e (c) $V_A = 240 \text{ V}$?

- 8.9** Para o motor CC de excitação independente do Problema 8-8:

- (a) Qual é a velocidade a vazio máxima que se pode atingir variando a tensão V_A e a resistência R_{aj} ?

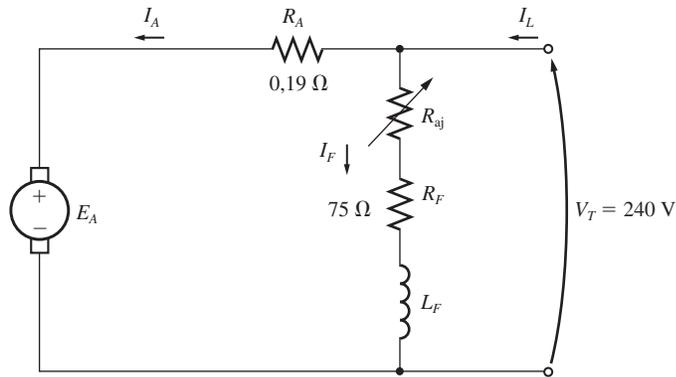


FIGURA P8-2
O circuito equivalente do motor em derivação dos Problemas 8-1 a 8-7

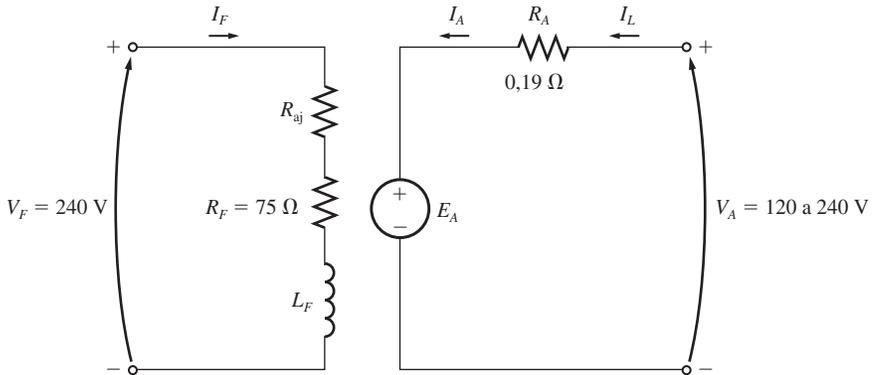


FIGURA P8-3
O circuito equivalente do motor de excitação independente dos Problemas 8-8 e 8-9.

- (b) Qual é a velocidade a vazio mínima que se pode atingir variando a tensão V_A e a resistência R_{aj} ?
- (c) Qual é a eficiência do motor em condições nominais? [*Observação:* Assuma que (1) a queda de tensão nas escovas é 2 V; (2) as perdas no núcleo devem ser determinadas para uma tensão de armadura igual à tensão de armadura a plena carga e (3) as perdas suplementares são 1% da plena carga.]

Nos Problemas 8-10 e 8-11, as ligações do motor são refeitas e o motor torna-se composto cumulativo, como está mostrado na Figura P8-4.

8.10 Se o motor for ligado como composto cumulativo tendo $R_{aj} = 175 \Omega$:

- (a) Qual é a velocidade a vazio do motor?
- (b) Qual é a velocidade de plena carga do motor?
- (c) Qual é sua regulação de velocidade?
- (d) Calcule e plote a característica de conjugado *versus* velocidade desse motor. (Despreze os efeitos de armadura neste problema.)

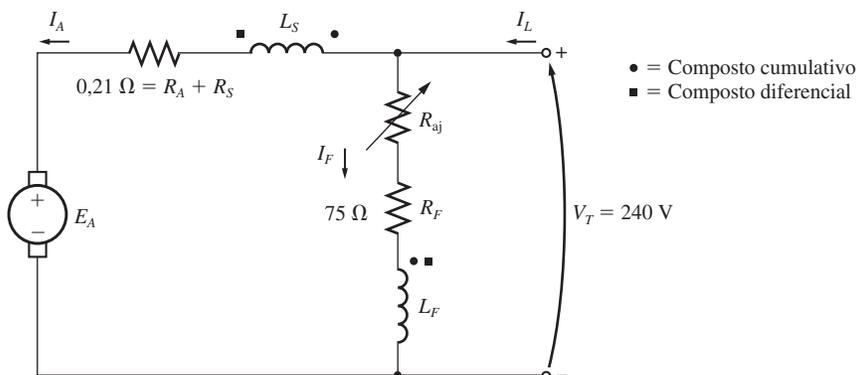


FIGURA P8-4

O circuito equivalente do motor composto dos Problemas 8-10 a 8-12.

8.11 O motor foi ligado como composto cumulativo e está operando a plena carga. Qual será a nova velocidade do motor se a resistência R_{sh} for aumentada para 250Ω ? Como a nova velocidade pode ser comparada com a velocidade de plena carga calculada no Problema 8-10?

No Problema 8-12, as ligações do motor são refeitas e o motor torna-se composto diferencial, como está mostrado na Figura P8-4.

8.12 Agora o motor é ligado como composto diferencial.

- (a) Se $R_{sh} = 175 \Omega$, qual será a velocidade a vazio do motor?
- (b) Qual é a velocidade do motor quando a corrente de armadura atinge 20 A? 40 A? 60 A?
- (c) Calcule e plote a curva característica de conjugado *versus* velocidade desse motor.

8.13 Um motor CC série de 7,5 HP e 120V tem uma reação de armadura de $0,1 \Omega$ e uma resistência de campo em série de $0,08 \Omega$. A plena carga, a corrente de entrada é 56 A e a velocidade nominal é 1050 rpm. Sua curva de magnetização está mostrada na Figura P8-5. As perdas no núcleo são 220 W e as perdas mecânicas são 230 W a plena carga. Assuma que as perdas mecânicas variam com o cubo da velocidade do motor e que as perdas no núcleo são constantes.

- (a) Qual é a eficiência do motor a plena carga?
- (b) Quais serão a velocidade e a eficiência do motor se ele estiver operando com uma corrente de armadura de 40 A?
- (c) Plote a característica de conjugado *versus* velocidade desse motor.

8.14 Um motor série de 20 HP, 240 V, 76 A e 900 rpm tem um enrolamento de campo de 33 espiras por polo. Sua resistência de armadura é $0,09 \Omega$ e sua resistência de campo é $0,06 \Omega$. A curva de magnetização, expressa em termos da força magnetomotriz *versus* E_A , para 900 rpm é dada pela tabela seguinte:

E_A, V	95	150	188	212	229	243
$\mathcal{F}, A \cdot e$	500	1000	1500	2000	2500	3000

A reação de armadura é desprezível nessa máquina.

- (a) Calcule o conjugado do motor, a velocidade e a potência de saída para 33, 67, 100 e 133% da corrente de armadura de plena carga. (Despreze as perdas rotacionais.)
- (b) Plote a característica de terminal da máquina.

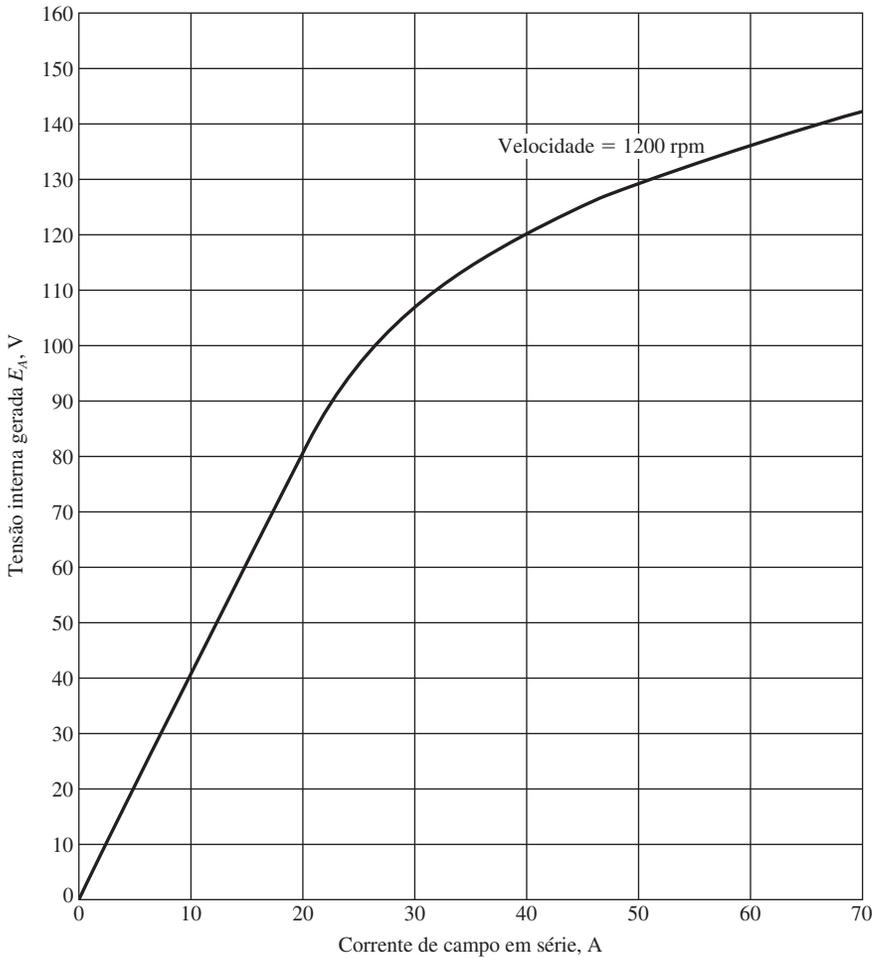


FIGURA P8-5

A curva de magnetização do motor série do Problema 8-13. Essa curva foi feita com uma velocidade constante de 1200 rpm.

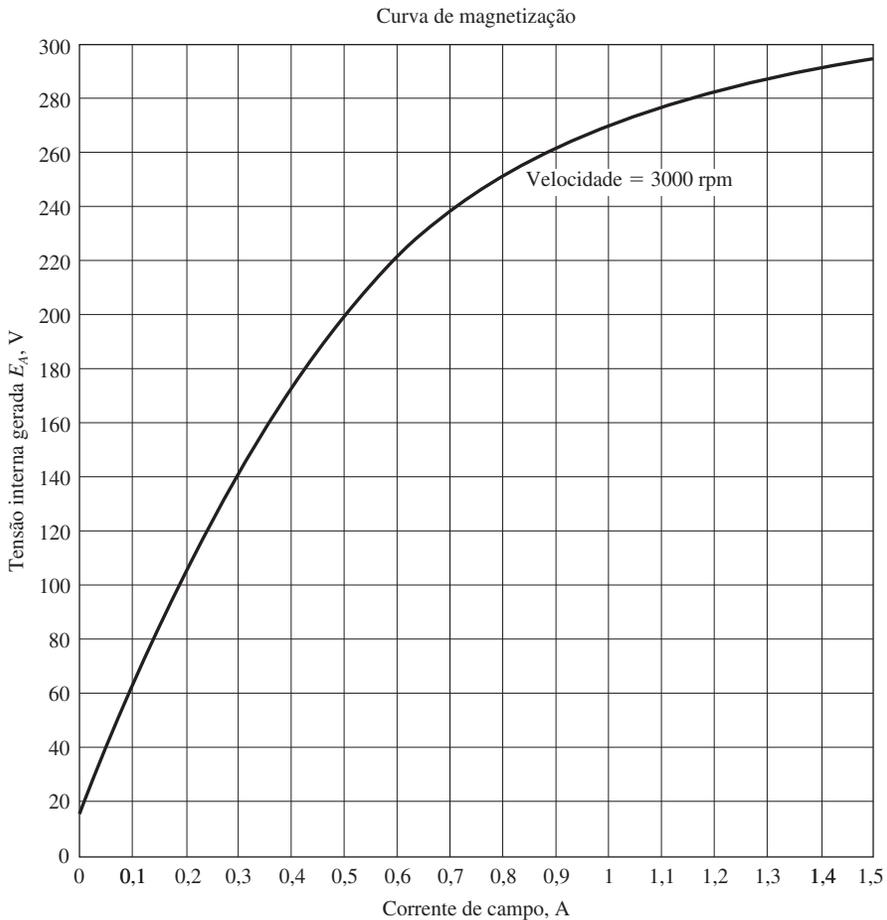
8.15 Um motor CC em derivação de 300 HP, 440 V, 560 A e 863 rpm foi submetido a ensaios e foram obtidos os seguintes dados:

Ensaio de rotor bloqueado:

$$\begin{aligned} V_A &= 14,9 \text{ V} && \text{excluindo as escovas} && V_F &= 440 \text{ V} \\ I_A &= 500 \text{ A} && && I_F &= 7,52 \text{ A} \end{aligned}$$

Operação a vazio:

$$\begin{aligned} V_A &= 440 \text{ V} && \text{incluindo as escovas} && I_F &= 7,50 \text{ A} \\ I_A &= 23,1 \text{ A} && && n &= 863 \text{ rpm} \end{aligned}$$

**FIGURA P8-6**

A curva de magnetização do motor CC dos Problemas 8-16 a 8-19. Essa curva foi feita com uma velocidade constante de 3000 rpm.

Qual é a eficiência desse motor nas condições nominais? [*Observação:* Assuma que (1) a queda de tensão nas escovas é 2 V; (2) as perdas no núcleo devem ser determinadas para uma tensão de armadura igual à tensão de armadura de plena carga e (3) as perdas suplementares são 1% da plena carga.]

Os Problemas 8-16 a 8-19 referem-se a um motor CC, de 240 V e 100 A, que tem enrolamentos em derivação e em série. Suas características são

$$R_A = 0,14 \, \Omega$$

$$N_F = 1500 \text{ espiras}$$

$$R_S = 0,05 \, \Omega$$

$$N_{SE} = 15 \text{ espiras}$$

$$R_F = 200 \, \Omega$$

$$n_m = 3000 \text{ rpm}$$

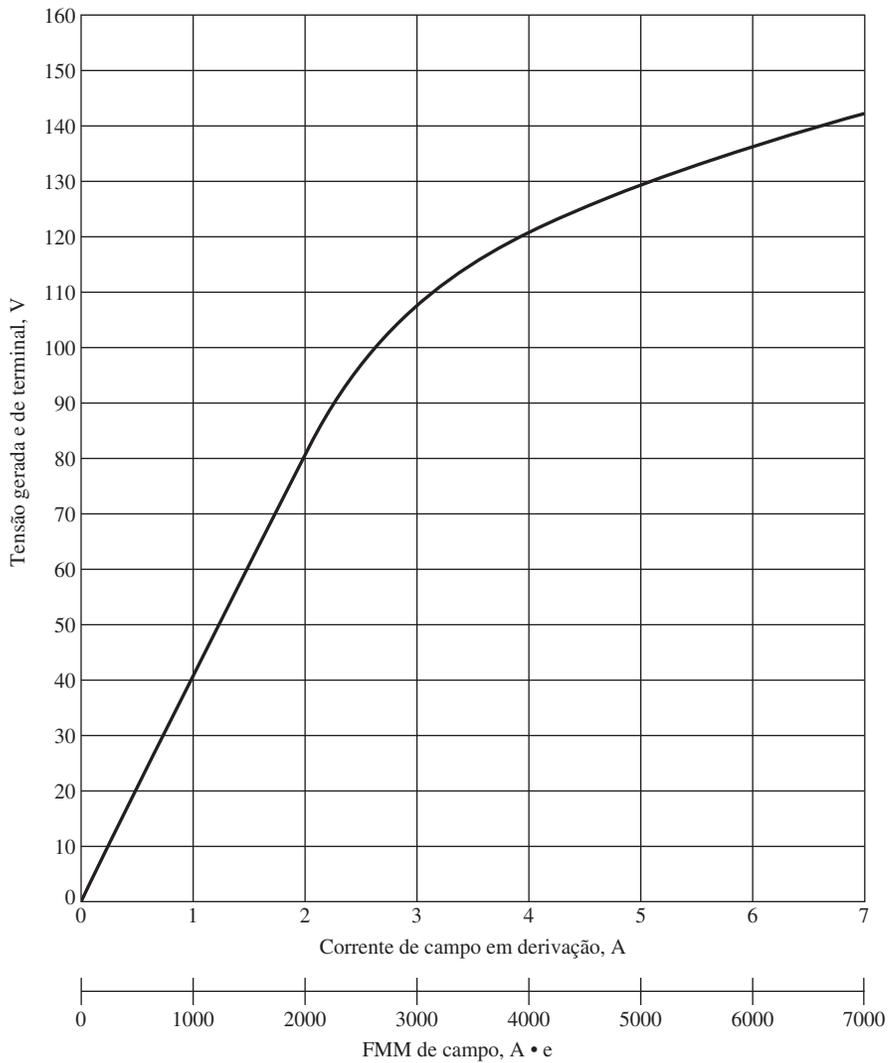
$$R_{aj} = 0 \text{ a } 300 \, \Omega, \text{ no momento ajustada em } 120 \, \Omega$$

Esse motor tem enrolamentos de compensação e interpolos. A curva de magnetização do motor para 3000 rpm está mostrada na Figura P8-6.

- 8.16** O motor descrito no problema anterior é ligado *em derivação*.
- (a) Qual é a velocidade a vazio desse motor quando $R_{aj} = 120 \Omega$?
 - (b) Qual é sua velocidade de plena carga?
 - (c) Qual é sua regulação de velocidade?
 - (d) Plote a característica de conjugado *versus* velocidade do motor.
 - (e) Em condições a vazio, qual é a faixa de velocidades possíveis que podem ser obtidas ajustando R_{aj} ?
- 8.17** Agora, máquina é ligada como um motor CC composto cumulativo com $R_{aj} = 120 \Omega$.
- (a) Qual é a velocidade a vazio do motor?
 - (b) Qual é sua velocidade de plena carga?
 - (c) Qual é sua regulação de velocidade?
 - (d) Plote a característica de conjugado *versus* velocidade desse motor.
- 8.18** O motor acima é ligado como um motor composto diferencial com $R_{aj} = 120 \Omega$. Obtenha a forma da sua característica de conjugado *versus* velocidade.
- 8.19** Agora, um motor série é construído a partir dessa máquina, excluindo completamente o campo em derivação. Obtenha a característica de conjugado *versus* velocidade do motor resultante.
- 8.20** Um circuito de partida automática deve ser projetado para um motor em derivação com valores nominais de 20 HP, 240 V e 75 A. A resistência de armadura do motor é $0,12 \Omega$ e a resistência do campo em derivação é 40Ω . O motor deve arrancar com não mais do que 250% da sua corrente de armadura nominal e, logo que a corrente baixar até o valor nominal, um segmento da resistência de partida deve ser removido. Quantos segmentos a resistência de partida deve ter e qual deve ser o valor de cada um?
- 8.21** Um motor CC em derivação de 10 HP, 120 V e 1000 rpm tem uma corrente de armadura de plena carga de 70 A quando está operando em condições nominais. A resistência de armadura do motor é $R_A = 0,12 \Omega$ e a resistência de campo R_F é 40Ω . A resistência ajustável R_{aj} do circuito de campo pode ser variada dentro do intervalo de 0 a 200Ω e, no momento, está ajustada para 100Ω . A reação de armadura pode ser ignorada nessa máquina. A curva de magnetização, obtida com uma velocidade de 1000 rpm, é dada pela tabela seguinte:

E_A, V	5	78	95	112	118	126
I_F, A	0,00	0,80	1,00	1,28	1,44	2,88

- (a) Qual é a velocidade do motor quando ele está operando nas condições nominais especificadas?
- (b) A potência de saída do motor é 10 HP nas condições nominais. Qual é seu conjugado de saída?
- (c) Quais são as perdas no cobre e as perdas rotacionais do motor a plena carga (ignore as perdas suplementares)?
- (d) Qual é a eficiência do motor a plena carga?
- (e) Se agora a carga do motor for retirada sem alterações na tensão de terminal nem em R_{aj} , qual será sua velocidade a vazio?
- (f) Suponha que o motor esteja funcionando nas condições a vazio descritas na parte (e). Que aconteceria ao motor se seu circuito de campo fosse aberto? Ignorando a reação de armadura, qual seria a velocidade final de regime permanente do motor nessas condições?
- (g) Que intervalo de velocidades a vazio é possível nesse motor, usando o intervalo de valores de resistência de campo, que podem ser obtidos variando R_{aj} ?

**FIGURA P8-7**

A curva de magnetização para os Problemas 8-22 a 8-28. Essa curva foi obtida com uma velocidade de 1800 rpm.

8.22 A curva de magnetização de um gerador CC de excitação independente está mostrada na Figura P8-7. As especificações nominais do gerador são 6 kW, 120 V, 50 A e 1800 rpm, e o gerador está ilustrado na Figura P8-8. A corrente nominal do seu circuito de campo é 5 A. Os seguintes dados da máquina são conhecidos:

$$R_A = 0,18 \, \Omega$$

$$V_F = 120 \, \text{V}$$

$$R_{aj} = 0 \text{ a } 40 \, \Omega$$

$$R_F = 20 \, \Omega$$

$$N_F = 1000 \text{ espiras por polo}$$

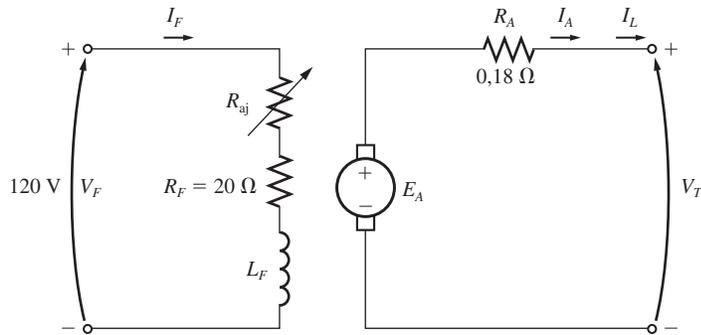


FIGURA P8-8
O gerador CC de excitação independente dos Problemas 8-22 a 8-24.

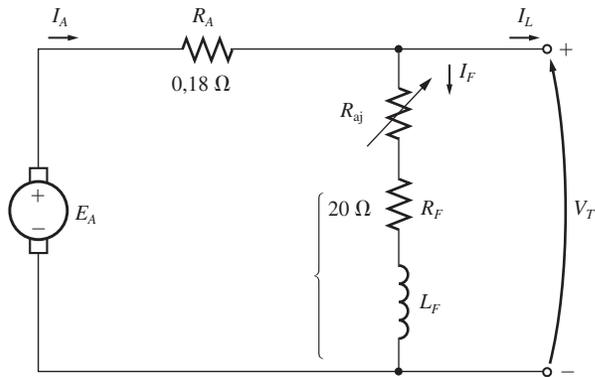


FIGURA P8-9
O gerador CC em derivação dos Problemas 8-25 e 8-26.

Responda às seguintes perguntas sobre o gerador, assumindo que não há reação de armadura.

- (a) Se esse gerador estiver funcionando a vazio, qual será o intervalo de ajustes de tensão que pode ser obtido variando R_{aj} ?
 - (b) Se o reostato de campo variar de 0 a 30 Ω e a velocidade do gerador variar de 1500 a 2000 rpm, quais serão as tensões a vazio máxima e mínima do gerador?
- 8.23** Se a corrente de armadura do gerador do Problema 8-22 for 50 A, a velocidade do gerador for 1700 rpm e a tensão de terminal for 106 V, qual será a corrente de campo que deverá estar circulando no gerador?
- 8.24** Assumindo que o gerador do Problema 8-22 tem uma reação de armadura a plena carga equivalente a 400 A • e de força magnetomotriz, qual será a tensão de terminal do gerador quando $I_F = 5$ A, $n_m = 1700$ rpm e $I_A = 50$ A?
- 8.25** A máquina do Problema 8-22 é ligada como um gerador CC em derivação e está mostrada na Figura P8-9. O resistor R_{aj} de campo em derivação é ajustado para 10 Ω e a velocidade do gerador é 1800 rpm.

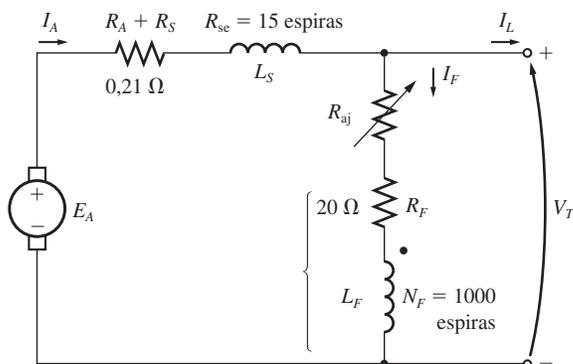


FIGURA P8-10

O gerador CC composto dos Problemas 8-27 e 8-28.

- (a) Qual é a tensão de terminal a vazio do gerador?
- (b) Assumindo que não há reação de armadura, qual é a tensão de terminal do gerador com uma corrente de armadura de 20 A? 40 A?
- (c) Assumindo que a plena carga há uma reação de armadura de $300 \text{ A} \cdot \text{e}$, qual é a tensão de terminal do gerador com uma corrente de armadura de 20 A? 40 A?
- (d) Calcule e plote as características de terminal desse gerador com e sem reação de armadura.
- 8.26** Se a máquina do Problema 8-25 estiver funcionando a 1800 rpm com uma resistência de campo $R_{aj} = 10 \Omega$ e uma corrente de armadura de 25 A, qual será a tensão de terminal resultante? Se o resistor de campo diminuir para 5Ω enquanto a corrente de armadura permanece em 25 A, qual será a nova tensão de terminal? (Assuma que não há reação de armadura.)
- 8.27** Um gerador CC composto cumulativo, de 120 v e 50 A, tem as seguintes características:

$$\begin{array}{ll} R_A + R_S = 0,21 \Omega & N_F = 1000 \text{ espiras} \\ R_F = 20 \Omega & N_{SE} = 25 \text{ espiras} \\ R_{aj} = 0 \text{ a } 30 \Omega, \text{ ajustada em } 10 \Omega & n_m = 1800 \text{ rpm} \end{array}$$

A máquina tem a curva de magnetização mostrada na Figura P8-7. Seu circuito equivalente está mostrado na Figura P8-10. Responda às seguintes perguntas sobre essa máquina, assumindo que não há reação de armadura.

- (a) Se o gerador estiver operando a vazio, qual será sua tensão de terminal?
- (b) Se o gerador tiver uma corrente de armadura de 20 A, qual será sua tensão de terminal?
- (c) Se o gerador tiver uma corrente de armadura de 40 A, qual será sua tensão de terminal?
- (d) Calcule e plote a característica de terminal dessa máquina.
- 8.28** Se a máquina descrita no Problema 8-27 for ligada como um gerador CC composto diferencial, como será a sua característica de terminal? Obtenha a curva do mesmo modo que no Problema 8-27.
- 8.29** Um gerador CC composto cumulativo está funcionando como um gerador CC composto do tipo normal. A seguir, a máquina é desligada e as conexões do seu campo em derivação são invertidas.

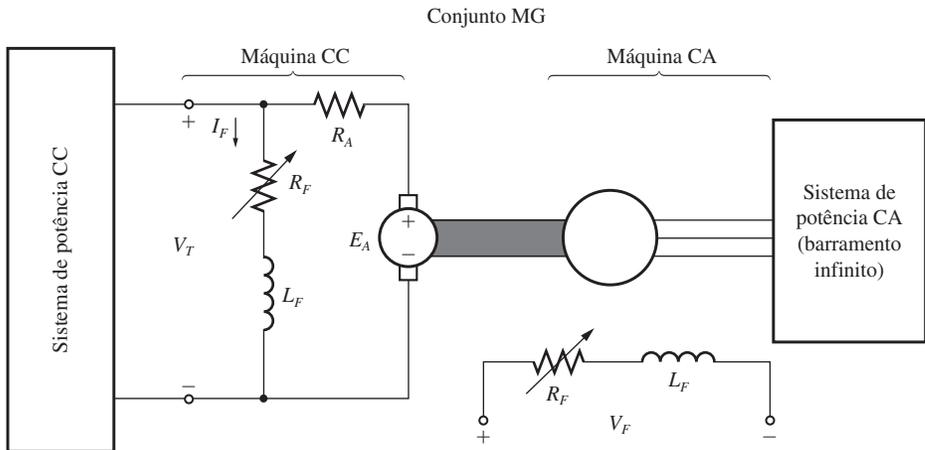


FIGURA 8-11
O conjunto motor-gerador do Problema 8-30.

- (a) Se esse gerador for girado no mesmo sentido que antes, haverá a geração de tensão inicial de saída (escorvamento) em seus terminais? Justifique sua resposta.
- (b) No sentido oposto de rotação, haverá geração de tensão inicial de saída (escorvamento)? Justifique sua resposta.
- (c) Para o sentido de rotação em que há geração de tensão inicial de saída (escorvamento), o gerador é composto cumulativo ou diferencial?

8.30 Uma máquina síncrona trifásica está acoplada mecanicamente a uma máquina CC em derivação, formando um conjunto motor-gerador, como está mostrado na Figura P8-11. A máquina CC está conectada a um sistema de potência CC, que fornece 240 V. A máquina CA está conectada a um barramento infinito de 480 V e 60 Hz.

A máquina CC tem quatro polos e especificações nominais de 50 kW e 240 V. Ela tem uma resistência de armadura de 0,03 por unidade. A máquina CA tem quatro polos e está ligada em Y. Suas especificações nominais são 50 kVA, 480 V e FP 0,8. Sua reatância síncrona em saturação é 3,0 Ω por fase.

Neste problema, todas as perdas, exceto a resistência de armadura da máquina CC, podem ser desprezadas. Assuma que as curvas de magnetização de ambas as máquinas são lineares.

- (a) Inicialmente, a máquina CA está fornecendo 50 kVA com FP 0,8 ao sistema de potência CA.
 1. Quanta potência está sendo fornecida ao motor CC pelo sistema de potência CC?
 2. Qual é o valor da tensão interna gerada E_A da máquina CC?
 3. Qual é o módulo da tensão interna gerada E_A da máquina CA?
- (b) Agora, a corrente de campo da máquina CA é reduzida em 5%. Que efeito essa alteração terá sobre a potência ativa fornecida pelo conjunto motor-gerador? Sobre a potência reativa fornecida pelo conjunto motor-gerador? Calcule as potências ativa e reativa, fornecida ou consumida pela máquina CA nessas condições. Desenhe o diagrama fasorial da máquina CA, antes e após a variação na corrente de campo.
- (c) Tomando como ponto de partida o item (b) anterior, a corrente de campo da máquina CC é agora reduzida em 1%. Que efeito essa alteração terá sobre a potência

ativa fornecida pelo conjunto motor–gerador? Sobre a potência reativa fornecida pelo conjunto motor–gerador? Calcule nessas condições as potências ativa e reativa, fornecida ou consumida pela máquina CA. Desenhe o diagrama fasorial da máquina CA, antes e após a variação da corrente de campo.

(d) Com base nos resultados anteriores, responda às seguintes perguntas:

1. Como se pode controlar o fluxo de potência ativa em um conjunto motor–gerador CA–CC?
2. Como se pode controlar a potência reativa, fornecida ou consumida pela máquina CA, sem afetar o fluxo de potência ativa?

REFERÊNCIAS

1. Chaston, A. N.: *Electric Machinery*, Reston Publications, Reston, Va., 1986.
2. Fitzgerald, A. E. e C. Kingsley, Jr. *Electric Machinery*, McGraw-Hill, Nova York, 1952.
3. Fitzgerald, A. E., C. Kingsley, Jr. e S. D. Umans: *Electric Machinery*, 6ª ed., McGraw-Hill, Nova York, 2003.
4. Heck, C.: *Magnetic Materials and Their Applications*, Butterworth & Co., London, 1974.
5. IEEE Standard 113-1985, *Guide on Test Procedures for DC Machines*, IEEE, Piscataway, N.J., 1985. (Observe que essa norma foi oficialmente retirada, mas ainda está disponível.)
6. Kloeffer, S. M., R. M. Kerchner e J. L. Breneman: *Direct Current Machinery*, ed. rev., Macmillan, Nova York, 1948.
7. Kosow, Irving L.: *Electric Machinery and Transformers*, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, N.J., 1972.
8. McPherson, George: *An Introduction to Electrical Machines and Transformers*, Wiley, Nova York, 1981.
9. Siskind, Charles S.: *Direct Current Machinery*, McGraw-Hill, Nova York, 1952.
10. Slemon, G. R. e A. Straughen. *Electric Machines*, Addison-Wesley, Reading, Mass., 1980.
11. Werninck, E. H. (ed.): *Electric Motor Handbook*, McGraw-Hill, London, 1978.