



UNIVERSIDADE FEDERAL DA BAHIA – ESCOLA POLITÉCNICA - DEM

DISCIPLINA: Elementos de Máquinas e Motores (ENG169)

TURMA: T01P01 (08:00 às 10:00)

PROFESSOR: Pedro Ornelas

DATA: 06/07/2000

ALUNOS:

Alberto Oliveira de A. Melo Neto

Alexandre Santana da Costa

Bruno Teles Cathalá Loureiro

Daniel Miranda Sousa

Manoela Martinez Castor de Cerqueira

Olavo Lima Matias

MOTORES ELÉTRICOS DE CORRENTE CONTÍNUA

Índice:

<u>1- OBJETIVO</u>	4
<u>2- INTRODUÇÃO ÀS MÁQUINAS ELÉTRICAS</u>	5
<u>3- A MÁQUINA CC</u>	6
<u>4- CONCEITOS E EQUAÇÕES FUNDAMENTAIS</u>	9
<u>4.1- FORÇA CONTRA-ELETROMOTRIZ</u>	9
<u>4.2- EQUAÇÃO DA TENSÃO ENTRE AS ESCOVAS</u>	10
<u>5- TORQUE, VELOCIDADE E POTÊNCIA NOS MOTORES CC</u>	12
<u>5.1- CONCEITO DE TORQUE E SUAS EQUAÇÕES BÁSICAS</u>	12
<u>5.2- RELACIONANDO VELOCIDADE COM FCEM E FLUXO</u>	15
<u>5.3- FCEM E POTÊNCIA MECÂNICA</u>	16
<u>5.4- RELACIONANDO TORQUE E VELOCIDADE</u>	17
<u>5.5- DISPOSITIVOS DE PARTIDA</u>	18
<u>5.6- TORQUE EM CADA TIPO DE MOTOR CC</u>	19
<u>5.6.1- Motor-Shunt</u>	19
<u>5.6.2- Motor-Série</u>	20
<u>5.6.3- Motores Compostos</u>	20
<u>5.7- VELOCIDADE EM CADA TIPO DE MOTOR CC</u>	20
<u>5.7.1- Motor-Shunt</u>	21
<u>5.7.2- Motor-Série</u>	21
<u>5.7.3- Motores Compostos</u>	22
<u>5.7.3.1- Motor Composto Cumulativo</u>	22
<u>5.7.3.1- Motor Composto Diferencial</u>	22
<u>5.8- REGULACÃO DE VELOCIDADE</u>	23
<u>5.9- TORQUE EXTERNO, HP E VELOCIDADE NOMINAIS</u>	23
<u>5.10- INVERTENDO O SENTIDO DA ROTAÇÃO</u>	24
<u>6- RENDIMENTO DOS MOTORES DE CC</u>	25
<u>7- QUADRO COMPARATIVO DE MOTORES DE CC</u>	26
<u>8- AVARIAS TÍPICAS DE UM MOTOR DE CC</u>	27
<u>8.1- PRODUÇÃO DE FAÍSCAS ENTRE O COMUTADOR E AS ESCOVAS</u>	27
<u>8.2- AQUECIMENTO ANORMAL DOS ÓRGÃOS DO MOTOR</u>	27
<u>8.2.1- Aquecimento do Induzido</u>	27
<u>8.2.2- Aquecimento do Indutor</u>	27
<u>8.2.3- Aquecimento do Comutador</u>	27
<u>8.2.4- Aquecimento dos Apoios</u>	28
<u>8.3- MOTOR NÃO ARRANCA</u>	28
<u>8.4- FUNCIONAMENTO RUIDOSO</u>	28
<u>9- DICAS DE MANUTENÇÃO</u>	29
<u>10- EXEMPLOS</u>	30
<u>10.1- CÁLCULO DE FCEM ENTRE ESCOVAS</u>	30
<u>10.2- CÁLCULO DE TORQUE MECÂNICO</u>	30
<u>10.3- CÁLCULO DE CORRENTE DE ARMADURA</u>	30
<u>10.4- CÁLCULO DE VELOCIDADE</u>	31
<u>10.5- CÁLCULO DE CORRENTE DE PARTIDA</u>	31

<u>10.6- CÁLCULO DE POTÊNCIA</u>	32
<u>10.7- CÁLCULO DE RENDIMENTO</u>	32
<u>11- CONCLUSÃO</u>	34
<u>12- BIBLIOGRAFIA E FONTES DE PESQUISA</u>	35

1- Objetivo

O objetivo deste trabalho é fornecer uma visão geral sobre a teoria envolvida no projeto de máquinas elétricas e, depois de discutida essa base teórica genérica, será dada ênfase à máquina elétrica funcionando como um motor de corrente contínua (motor CC). Serão descritas as suas partes constituintes, além de apresentadas as equações que descrevem o seu funcionamento. Será feita uma comparação entre os diferentes tipos de motores CC, apresentados aspectos de diagnósticos de avarias e noções de manutenção. Ao fim do trabalho, serão colocados exemplos de cálculos de variáveis envolvidas nos motores CC.

2- Introdução às Máquinas Elétricas

Uma máquina elétrica é uma máquina capaz de converter energia mecânica em energia elétrica (*gerador*) ou energia elétrica em mecânica (*motor*). Quando se trata de um gerador, a rotação é suprida por uma fonte de energia mecânica como, por exemplo, uma queda d'água, para produzir o movimento relativo entre os condutores elétricos e o campo magnético e gerar, desse modo, uma tensão entre os terminais do condutor. No caso de motores, o funcionamento é inverso: energia elétrica é fornecida aos condutores e ao campo magnético (no caso de ele ser gerado por eletroímãs) para que surja a força magnética nos condutores, compondo um binário e causando a rotação (energia mecânica). Concluindo, sempre há movimento relativo entre condutor e campo magnético.

Portanto, há várias possibilidades de construção de máquina elétricas, que sempre são compostas por *estator* (parte estacionária) e *rotor* (parte que gira). Algumas dessas possibilidades são:

- ✓ A *máquina de corrente contínua* (CC), que tem uma armadura rotativa e um campo estacionário.
- ✓ A *máquina síncrona* (CA) com uma armadura rotativa e um campo estacionário.
- ✓ A *máquina síncrona* (CA) com um campo rotativo e uma armadura fixa.
- ✓ A *máquina assíncrona* (CA), que possui ambos, enrolamento da armadura estacionários e rotativos.

Este trabalho se fixará no estudo do primeiro caso e, ainda mais especificamente, no caso dos motores.

3- A Máquina CC

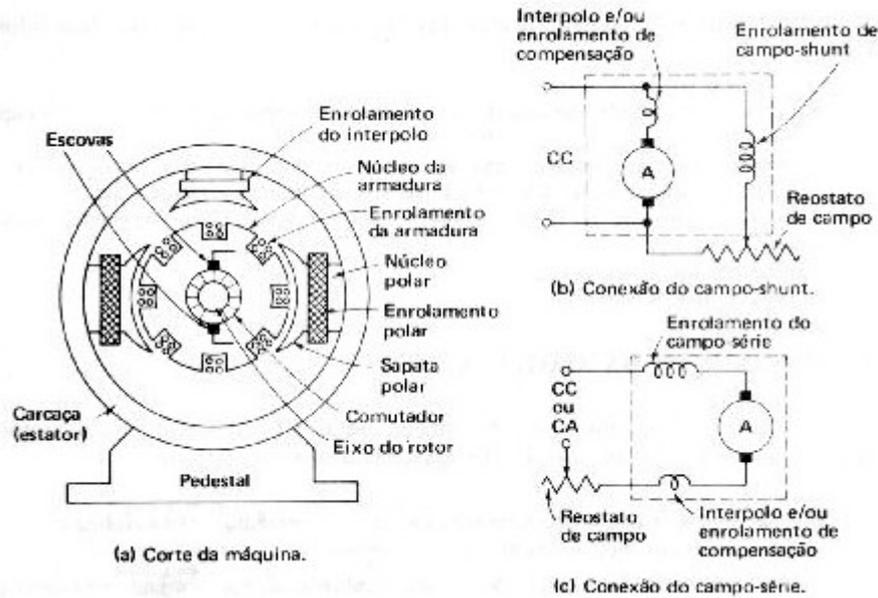


Fig. 3-1

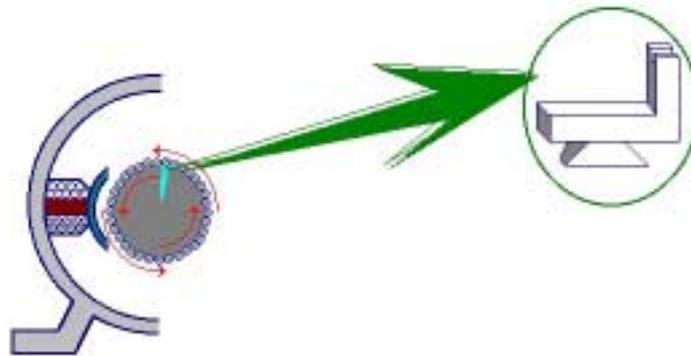


Fig. 3-2

A Fig. 3-1 mostra um corte de uma máquina CC comercial típica, simplificada para dar ênfase às partes principais. A Fig. 3-2 mostra um detalhe do núcleo da armadura.

O rotor consiste de:

- ✓ **Eixo da armadura:** imprime rotação ao núcleo da armadura, enrolamentos e comutador.
- ✓ **Núcleo da armadura:** está conectado ao eixo e é construído de camadas laminadas de aço, provendo uma faixa de baixa relutância magnética entre os pólos. As lâminas servem para reduzir as correntes parasitas no núcleo, e o aço usado é de qualidade destinada a produzir uma baixa perda por histerese. O núcleo contém ranhuras axiais na sua periferia para colocação do enrolamento da armadura. Veja o detalhe na Fig. 3-2.

- ✓ **Enrolamento da armadura:** é constituído de bobinas isoladas entre si e do núcleo da armadura. É colocado nas ranhuras e eletricamente ligado ao comutador.
- ✓ **Comutador:** devido à rotação do eixo, providencia o necessário chaveamento para o processo de comutação. O comutador consiste de segmentos de cobre, individuais isolados entre si e do eixo, eletricamente conectados às bobinas do enrolamento da armadura.

O rotor da armadura das máquinas de CC tem quatro funções principais: (1) permite rotação para ação geradora ou ação motora mecânica; (2) em virtude da rotação, produz a ação de chaveamento necessário para a comutação; (3) contém os condutores que induzem a tensão ou providenciam um torque eletromagnético; e (4) providencia uma faixa de baixa relutância para o fluxo.

O estator da máquina CC consiste de:

- ✓ **Carcaça:** é uma carapaça ou estrutura cilíndrica de aço ou ferro fundido ou laminado. Não apenas a carcaça serve como suporte das partes descritas acima, mas também providencia uma faixa de retorno do fluxo para o circuito magnético criado pelos enrolamentos de campo.
- ✓ **Enrolamento de campo:** consiste de umas poucas espiras de fio grosso para o campo-série ou muitas espiras de fio fino para o campo-shunt. Essencialmente, as bobinas de campo são eletromagnetos, cujos ampère-espiras (Ae) providenciam uma força magnetomotriz adequada à produção, no entreferro, do fluxo necessário para gerar uma fem ou uma força mecânica. Os enrolamentos de campo são suportados pelos pólos.
- ✓ **Pólos:** são constituídos de ferro laminado e parafusados ou soldados na carcaça após a inserção dos enrolamentos de campo nos mesmos. A sapata polar é curvada, e é mais larga que o núcleo polar, para espalhar o fluxo mais uniformemente.
- ✓ **Interpolo:** ele e o seu enrolamento também são montados na carcaça da máquina. Eles estão localizados na região interpolar, entre os pólos principais, e são geralmente de tamanho menor. O enrolamento do interpolo é composto de algumas poucas espiras de fio grosso, pois é ligado em série com o circuito da armadura, de modo que a fem é proporcional á corrente da armadura.
- ✓ **Escovas e Anéis-Suporte de Escovas:** assim como os interpolos, são parte do circuito da armadura. As escovas são de carvão e grafite, suportadas na estrutura do estator por um suporte tipo anel, e mantidas no suporte por meio de molas, de forma que as escovas manterão um contato firme com os segmentos do comutador. As escovas estão sempre instantaneamente conectadas a um segmento e em contato com uma bobina localizada na zona interpolar.
- ✓ **Detalhes mecânicos:** mecanicamente conectados a carcaça, estão os suportes contendo mancais nos quais o eixo da armadura se apóia, bem como os anéis-suporte de escovas em algumas máquinas.

As conexões elétricas da máquina de CC são mostradas na Fig. 3-1b e 3-1c. A primeira mostra as conexões de **campo-shunt**, no qual os enrolamentos do campo estão em paralelo com o circuito da armadura. A última mostra a conexão do **campo-série**, na qual o enrolamento de poucas

espiras com fio grosso de campo-série está localizado nos pólos principais e ligado em série com o circuito da armadura, bem como as escovas. Note que as conexões do campo-shunt da Fig. 3-1b empregam o reostato de campo ao circuito do campo.

É mais importante observar que a máquina de CC da Fig. 3-1c pode ser usada universalmente e operará seja como máquina CC ou CA, ou ambas, como no caso do motor universal. A maior parte dos geradores e motores de CC emprega a estrutura mostrada na Fig. 3-1a e as conexões elétricas das Figs. 3-1b e 3-1c. Mais tarde, será visto que algumas máquinas combinam as conexões de campo mostradas nestas figuras, criando as *máquinas compostas*.

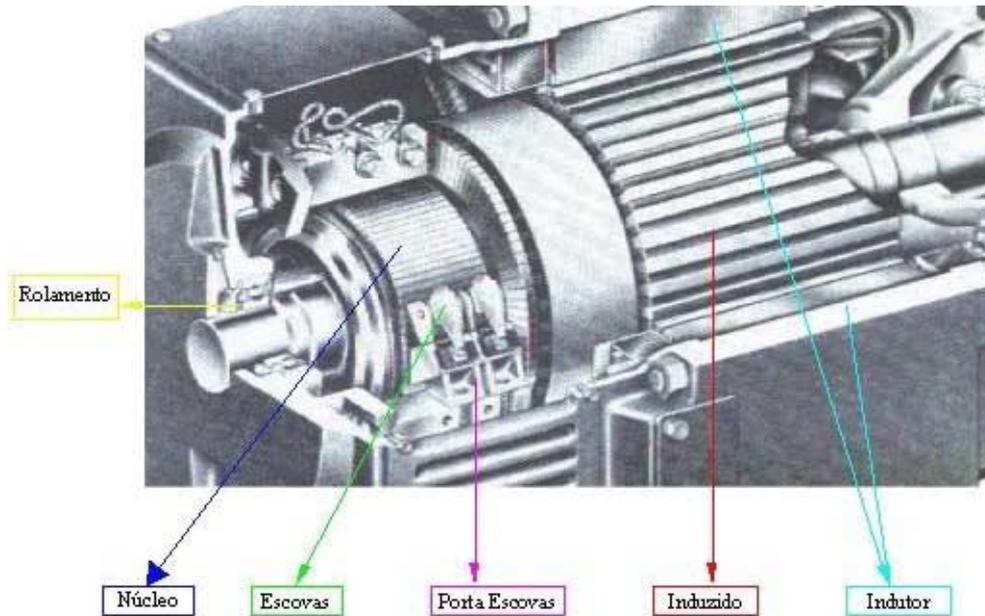


Fig. 3-3

A Fig. 3-3 mostra a foto de um motor elétrico CC típico.

4- Conceitos e Equações Fundamentais

4.1- Força Contra-Eletromotriz

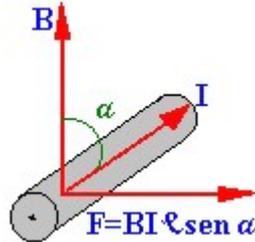


Fig. 4-1

A Fig.4-1 mostra a ação motora, para o sentido de campo e corrente de armadura representados na figura. Mas a força desenvolvida no condutor faz com que ele se movimente no campo magnético, resultando numa variação do fluxo magnético em torno do condutor. Uma **Força Eletromotriz (fem)** é induzida no condutor “motor” da Fig. 4-1. O sentido dessa *fem* induzida é o sentido oposto ao da força representada na figura, para os mesmos sentidos de movimento e campo. Aplicando esta *fem* induzida ao condutor da Fig. 4-1, observa-se que ela se opõe ou se desenvolve em sentido contrário ao da circulação da corrente que criou a força ou o movimento; assim é ela chamada de **Força Contra-Eletromotriz (fcem)**. Note que o desenvolvimento de uma força contra-eletromotriz é uma aplicação da Lei de Lenz com respeito ao fato de que o sentido da tensão induzida opõe-se à *fem* aplicada que a criou. Assim, quando quer que ocorra a ação motora, uma ação geradora é simultaneamente desenvolvida.

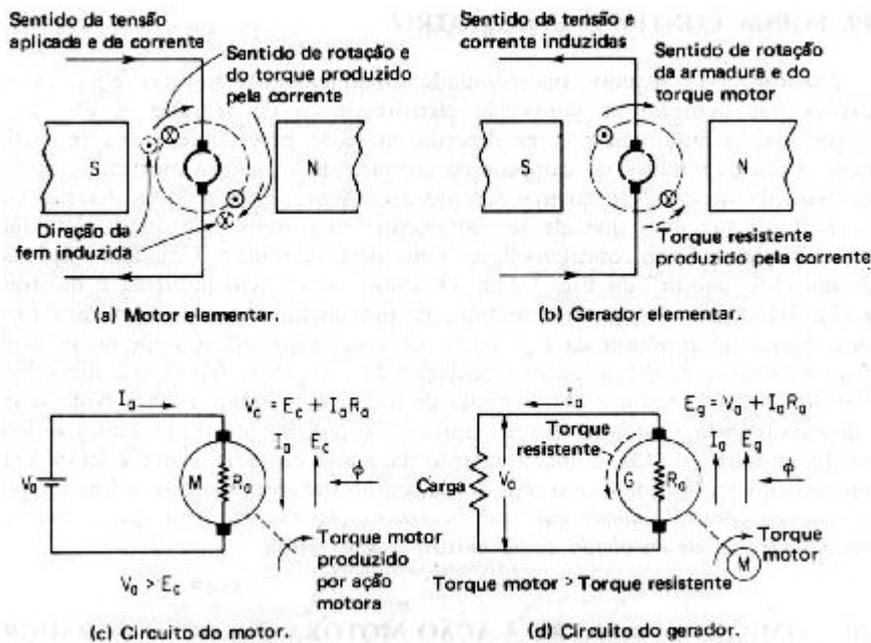


Fig. 4-2

Uma representação mais gráfica, em termos de elementos rotativos, é apresentada na Fig. 4-2, que compara motor e gerador elementares para o mesmo sentido de rotação e mostra o circuito elétrico de cada um. Dado o sentido da tensão aplicada e da corrente, a ação motora que resulta produz uma força, que gira no sentido horário, em ambos os condutores. O sentido da força contraeletromotriz induzida é também mostrado como oposto ao da tensão aplicada. Note que para que a corrente produza uma rotação no sentido horário e tenha o sentido mostrado na Fig. 4-2c, é necessário que a tensão aplicada aos terminais da armadura, V_a , seja maior que a f_{cem} desenvolvida, E_c . Assim, quando uma máquina é operada como motor, a f_{cem} gerada é sempre menor que a tensão nos terminais que produzem a ação motora e se opõe à corrente de armadura. Tal discussão dá lugar à equação básica do circuito da armadura mostrada na Fig. 4-2 e resumida como se segue:

Para um motor,

$$\boxed{V_a = E_c + I_a \cdot R_a} \quad (\text{Eq. 4-1})$$

onde V_a é a tensão aplicada (medida nos terminais) de lado a lado da armadura

E_c é a f_{cem} gerada, desenvolvida na armadura do motor

$I_a \cdot R_a$ é a queda de tensão na armadura devido à circulação da corrente através de uma armadura de resistência R_a .

Podemos obter V_a e I_a a partir de medidas efetuadas com instrumentos apropriados. No próximo item, veremos como calcular E_c em função das especificações do motor.

As relações eletromecânicas fundamentais que distinguem a máquina operando como gerador da máquina operando como motor, podem ser resumidas abaixo:

Ação Motora	Ação Geradora
1. O torque eletromagnético produz (ajuda) a rotação.	1. O torque eletromagnético (desenvolvido no condutor percorrido pela corrente) opõe -se à rotação (Lei de Lenz).
2. A tensão gerada se opõe à corrente da armadura (Lei de Lenz).	2. A tensão gerada produz (ajuda) a corrente da armadura.
3. $E_c = V_a - I_a \cdot R_a$	3. $E_g = V_a + R_a \cdot I_a$

4.2- Equação da Tensão Entre as Escovas

Através da Lei de Faraday, que estabelece que a tensão induzida que surge num circuito ao se movimentar num campo magnético tem módulo igual à taxa de variação no tempo do fluxo magnético através deste mesmo circuito, podemos chegar à expressão:

$$\boxed{E_c = 4 \cdot \phi \cdot N_e \cdot n \cdot 10^{-8} V} \quad (\text{Eq. 4-2})$$

onde ϕ é o fluxo magnético através das espiras (em maxewlls)

N_e é o número de espiras por bobina

n é a velocidade relativa em rotações por segundo (rps) entre a bobina de N_e espiras e o campo magnético.

Com a Eq. 4-2, podemos calcular a tensão média nominal de uma bobina (com uma ou mais espiras), girando a uma dada velocidade (rps), sob um pólo dado cujo campo tenha um valor determinado.

Se Z é o número total de condutores de armadura e se a é o número de caminhos de bobinas paralelos entre escovas de polaridade oposta, então o número total de espiras N_e por circuito de armadura é $Z/2a$. E ainda, se a velocidade N é dada em rpm, então $n=N/60$. Finalmente, como a Eq. 4-2, é derivada de uma máquina bipolar, se uma máquina tem P pólos, o resultado deve ser multiplicado por $P/2$. A *fem* média total induzida entre as escovas, então, é:

$$E_c = 4\phi.N_e n.10^{-8} = 4\phi.\left(\frac{P}{2}\right)\left(\frac{Z}{2a}\right)\left(\frac{N}{60}\right)10^{-8} = \left(\frac{\phi.Z.N.P}{60.a}\right)10^{-8}V \quad (\text{Eq. 4-3})$$

onde ϕ é o fluxo por pólo

P é o número de pólos

Z é o número de condutores da armadura (duas vezes o número total de espiras da armadura)

a é o número de caminhos paralelos na armadura

N é a velocidade em rpm.

A Eq. 4-3 é aplicada a motores e geradores CC. Para os motores, os condutores da armadura giram perto de um campo magnético e neles será induzida uma *fem*, de acordo com a Eq. 4-3, chamada força contra-eletromotriz (*fcem*).

5- Torque, Velocidade e Potência nos Motores CC

5.1- Conceito de Torque e suas Equações Básicas

Esta parte será dedicada ao estudo das relações de torque das máquinas de corrente contínua e às características do motor de CC como meio de produzir um torque eletromagnético.

Para a ação motora, tem-se:

- ✓ O torque eletromagnético desenvolvido produz (mantém) rotação
- ✓ A tensão gerada nos condutores onde circula corrente (força contra-eletromotriz) se opõe à corrente da armadura
- ✓ A força contra-eletromotriz pode ser expressa pela equação: $E_c = V_a - I_a \cdot R_a$ e é menor que a tensão aplicada que causa a circulação da corrente de armadura I_a .

A equação acima pode ser reescrita em termos da corrente de armadura (I_a), produzida para uma dada tensão aplicada e uma dada carga:

$$I_a = \frac{V_a - E_c}{R_a} \quad (\text{Eq. 5-1})$$

Podemos escrever a força eletromagnética em função dos três fatores que determinam a sua magnitude e que são requeridos para produzi-la num condutor onde circula uma corrente elétrica (uma força ortogonal a B e I):

$$F = \frac{B \cdot I \cdot l}{1,13} \cdot 10^{-7} \text{ lbf} \quad (\text{Eq. 5-2})$$

A direção da força eletromagnética desenvolvida pela circulação de corrente no condutor num dado campo magnético pode ser determinada pela regra da mão direita.

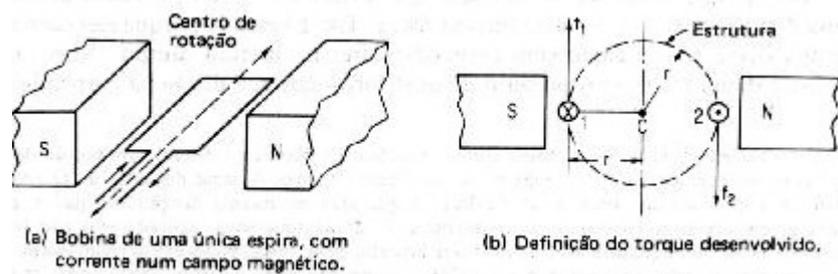


Fig. 5-1

Os termos *força eletromagnética* e *torque eletromagnético* não são sinônimos, mas estão relacionados. A relação entre a força num condutor e o torque é mostrado na Fig. 5-1.

Uma bobina constituída de uma única espira (suportada por uma estrutura capaz de rotação), supõe-se estar carregando corrente num campo magnético, como se vê na Fig. 5-1a. De acordo com a última equação descrita e a regra da mão direita, desenvolve-se uma força ortogonal f_1 no lado 1 da bobina e uma força similar f_2 é desenvolvida no lado 2 da bobina, como se vê na Fig 5-1b. As

forças f_1 e f_2 são desenvolvidas numa direção tal que tendem a produzir a rotação no sentido horário da estrutura que suporta os condutores em redor do centro de rotação C .

Torque é definido como a tendência do acoplamento mecânico (de uma força e sua distância radial ao eixo de rotação) para produzir rotação. É expresso em unidades de força e distância, como lbf.pé, grama.cm, N.m, etc , para distingui-lo do trabalho, que é expresso em pé.lbf, cm.g, etc. O torque que atua na estrutura da Fig. 5-1b é a soma dos produtos $f_1.r$ e $f_2.r$, ou seja, a soma total dos torques, atuantes sobre ou produzidos pelos condutores individuais que tendem a produzir rotação. Note-se que as forças f_1 e f_2 são iguais em magnitude, pois os condutores estão colocados num campo magnético de mesma intensidade e conduzem a mesma corrente.

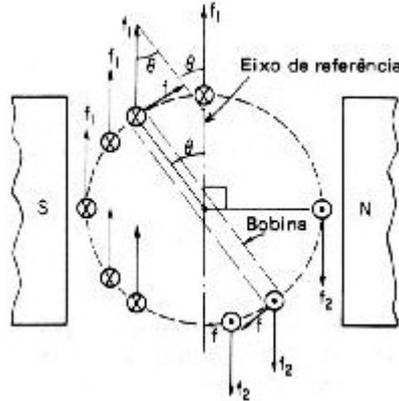


Fig. 5-2

A distinção entre a força desenvolvida nos vários condutores da armadura e o torque útil desenvolvido por estes condutores para produzir rotação é vista na Fig. 5-2.

Uma armadura e um campo de um motor de dois pólos são vistos na Fig. 5-2. Note-se que todos os condutores que possuem corrente circulando numa mesma direção desenvolvem uma mesma força. Isto é verdade porque eles carregam a mesma corrente e permanecem perpendiculares no mesmo campo. Mas, como o torque é definido como o produto de uma força e de sua distância perpendicular ao eixo, nós podemos ver que a componente útil da força desenvolvida é:

$$f = F \text{ sen } \theta \quad (\text{Eq. 5-3})$$

onde F é a força em cada condutor e θ é o complemento do ângulo criado pela força desenvolvida no condutor e a força f útil tangencial à periferia da armadura; e, assim, o torque desenvolvido por qualquer condutor, T_c , na superfície da armadura é:

$$T_c = f.r = (F.\text{sen } \theta).r \quad (\text{Eq. 5-4})$$

onde f é a força perpendicular a r

r é a distância radial ao eixo de rotação

Note-se que os condutores que se encontram na região interpolar da Fig. 5-2 desenvolvem (teoricamente) uma força idêntica à dos condutores que se encontram diretamente sob a superfície polar; mas que a componente útil da força, f , tangencial a armadura é zero. Além disso, se a bobina da Fig. 5-2 é livre para girar no sentido do torque desenvolvido sem que haja comutação, os

sentidos nos condutores permanecem inalterados, mas a força neles desenvolvida sofrerá uma reversão, como se vê na Fig. 5-3.

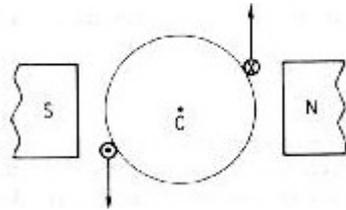


Fig. 5-3

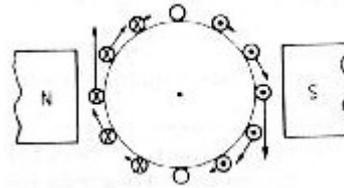


Fig.5-4

A necessidade de comutação para reverter a corrente num condutor à medida que se move sob um pólo de polaridade oposta é tão fundamental para um motor de CC. Finalmente, como nenhum torque útil é produzido por condutores que se encontram na região interpolar, pouco torque é perdido pelos condutores que estão em comutação. Isto é o que se mostra na Fig. 5-4, onde as componentes de força útil e suas magnitudes são indicadas, bem como a reversão de corrente requerida para produzir rotação uniforme e contínua.

As relações precedentes foram desenvolvidas para uma armadura possuindo campos polares retos e uma apreciável zona interpolar neutra. Como se vê na Fig.4-5, numa armadura comercial possuindo muitos pólos, ranhuras e condutores na armadura, a diferença entre a força útil desenvolvida diretamente sob o pólo e a desenvolvida quase na extremidade polar é relativamente pequena. É costume, em vez disso, considerar apenas a percentagem de condutores diretamente sob o pólo que contribuem para o torque útil, e supor que cada condutor produz um torque médio ou comum.

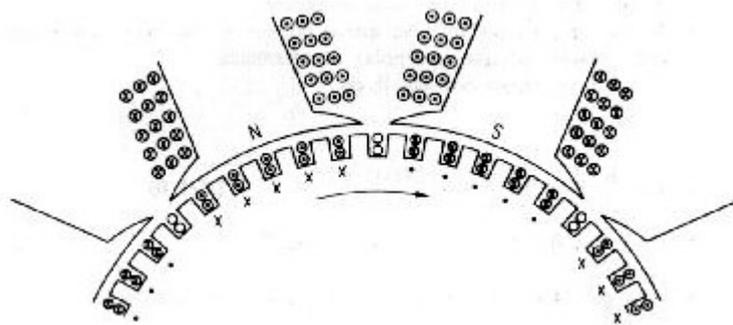


Fig. 5-5

Estas considerações nos levam a simples relação:

$$F_{méd} = F_c \cdot Z_a \quad (\text{Eq. 5-5})$$

onde $F_{méd}$ é a força média total tendendo a girar a armadura

F_c é a força média por condutor diretamente sob o pólo

Z_a é o número de condutores ativos da armadura

Isto simplifica o cálculo do torque total desenvolvido pela armadura:

$$T_{méd} = F_{méd} \cdot r = F_c \cdot Z_a \cdot r \quad (\text{Eq. 5-6})$$

A discussão precedente indica que o torque desenvolvido pela armadura de qualquer máquina pode ser computado em função do número de pólos, caminhos, condutores, e fluxo por pólo concatenando os condutores da armadura, etc. Operando algebricamente as equações desenvolvidas até aqui, podemos chegar à equação que é dita ser a **Equação Fundamental do Torque em Máquinas de CC**:

$$T = 0,1173 \cdot \frac{P}{a} \cdot Z \cdot I_a \cdot \phi \cdot 10^{-8} \text{ lbf} \cdot \text{pé} \quad (\text{Eq. 5-7})$$

onde P é o número de pólos

a é o número de caminhos

Z é o número de condutores ativos na superfície da armadura, cada um produzindo um torque médio útil

I_a é a corrente total que penetra na armadura

ϕ é o fluxo por pólo concatenando os condutores

Para qualquer máquina de CC, contudo, os números de caminhos, pólos e condutores na armadura são fixos ou constantes e, portanto, a equação para o torque eletromagnético desenvolvido para uma dada armadura pode ser escrita apenas em função de suas possíveis variáveis como

$$T = k \cdot \phi \cdot I_a \text{ lbf} \cdot \text{pé} \quad (\text{Eq. 5-8})$$

onde ϕ e I_a , representam o mesmo que na Eq. 5-7 e $k = 0,1173 \cdot (P/a) \cdot Z \cdot 10^{-8}$ para qualquer máquina.

Note-se, também, que este torque eletromagnético se opõe à rotação num gerador e auxilia (atua no mesmo sentido) a rotação num motor. Como o torque é função do fluxo e da corrente da armadura, é independente da velocidade do motor ou do gerador. Será visto a seguir que a velocidade do motor, de fato, depende do torque. Os termos **torque** e **velocidade** não podem, entretanto, ser usados como sinônimos, pois um motor bloqueado tende a desenvolver um torque apreciável, mas nenhuma velocidade.

5.2- Relacionando Velocidade com f_{cem} e Fluxo

Para uma dada máquina CC, as Eqs. 4-2 ou 4-3 podem ser reescritas em função de suas variáveis e a f_{cem} de um motor pode ser expressa por:

$$E_c = k \cdot \phi \cdot N \quad (\text{Eq. 5-9})$$

onde ϕ é o fluxo do pólo

k é $(Z \cdot P / 60 \cdot a) \cdot 10^{-8}$ para uma dada máquina

N é a velocidade da rotação do motor em rpm

Mas a f_{cem} do motor, incluindo a queda de tensão nas escovas, BD , é:

$$E_c = V_a - (I_a R_a + BD) \quad (\text{Eq. 5-10})$$

Substituindo $k \cdot \phi \cdot N$ por E_c , da Eq. 5-9, e solucionando em função da velocidade N , resulta:

$$N = \frac{V_a - (I_a \cdot R_a + BD)}{k \cdot \phi} \quad (\text{Eq. 5-11})$$

onde todos os termos já foram previamente definidos.

A Eq. 5-11 pode ser chamada **Equação Fundamental da Velocidade do Motor CC**, pois permite prever rapidamente a performance de um motor de CC. Por exemplo, se o fluxo polar é enfraquecido consideravelmente, o motor tende a disparar. Se o denominador da Eq. 5-11 tende a zero, a velocidade se aproxima do infinito. Do mesmo modo, se a corrente e o fluxo são mantidos constantes, enquanto a tensão aplicada através da armadura é aumentada, a velocidade aumenta na mesma proporção. Finalmente, se o fluxo polar e a tensão aplicada nos terminais da armadura permanecem fixos e a corrente da armadura aumenta por acréscimo de carga, a velocidade do motor cairá numa mesma proporção com o decréscimo da f_{cem} .

5.3- f_{cem} e Potência Mecânica

De um modo geral, a f_{cem} a plena carga é menor que a f_{cem} para cargas mais leves. Como função da tensão aplicada aos terminais da armadura, a f_{cem} a plena carga varia desde aproximadamente 80%, nos pequenos motores, até 95% da tensão aplicada, nos motores maiores. A f_{cem} (E_c) como percentagem da tensão da armadura (V_a) é um dado importante na determinação da eficiência relativa e da potência mecânica desenvolvida por uma dada armadura. A potência mecânica desenvolvida pela armadura pode ser derivada como mostrado abaixo.

A queda de tensão na resistência da armadura, ignorando-se a queda nas escovas (BD), é:

$$I_a \cdot R_a = V_a - E_c \quad (\text{Eq. 4-1})$$

e a potência perdida na armadura, quando se aplica a tensão V_a e I_a circula, é (multiplicando ambos os membros da Eq. 4-1 por I_a):

$$(I_a \cdot R_a) \cdot I_a = (V_a - E_c) \cdot I_a \quad \text{ou}$$

$$I_a^2 \cdot R_a = V_a \cdot I_a - E_c \cdot I_a$$

Isolando $E_c \cdot I_a$, teremos:

$$E_c \cdot I_a = V_a \cdot I_a - I_a^2 \cdot R_a \quad (\text{Eq. 5-12})$$

O significado da Eq. 5-12 é de que, quando potência elétrica, $V_a \cdot I_a$, é suprida ao circuito da armadura do motor para produzir rotação, uma certa parcela da potência é dissipada nos vários componentes que constituem o circuito da resistência da armadura. Esta dissipação é denominada **perda no cobre da armadura**, $I_a^2 \cdot R_a$. A potência remanescente, $E_c \cdot I_a$, é requerida pela armadura para produzir o torque interno ou desenvolvido. A relação entre a potência desenvolvida e a potência suprida à armadura, $E_c \cdot I_a / V_a \cdot I_a$, é a mesma que a relação E_c / V_a . Assim, quanto maior a percentagem da f_{cem} com relação à tensão aplicada a armadura, maior a eficiência do motor. Mais ainda, para uma dada corrente de carga, é evidente que, quando a f_{cem} for máxima, o motor desenvolverá a máxima potência para aquele valor da corrente da armadura (I_a).

Poderia parecer a partir da Eq. 5-9 que, para desenvolver o máximo valor possível da f_{cem} , fosse necessário apenas aumentar a corrente de campo e o fluxo a um máximo (sem sobreaquecer o enrolamento de campo) e, ao mesmo tempo, “operar” o motor em velocidades muito elevadas. Mas

a Eq. 5-11 mostra que, quando o fluxo de campo é aumentado, a velocidade diminui. Além disso, tanto a velocidade como a f_{cem} são, em parte, determinadas pela carga mecânica aplicada ao motor.

5.4- Relacionando Torque e Velocidade

Supondo nula a queda no contato das escovas e observando as Eqs. 4-1, 5-8 e 5-11, pode parecer que existe uma inconsistência: sendo o torque definido como uma força tendendo a criar rotação, com o aumento do fluxo (ϕ) haverá aumento do torque (Eq. 5-8) e, conseqüentemente, da velocidade, mas esse mesmo aumento do fluxo implica na redução da velocidade (Eq. 5-11). Com o uso da Eq. 4-1, é possível resolver essa contradição:

- ✓ O fluxo polar de um motor-shunt é reduzido pelo decréscimo da corrente de campo.
- ✓ A força contra eletromotriz (f_{cem}), $E_c = k.\phi.N$, cai instantaneamente (a velocidade permanece constante como resultado da inércia da armadura grande e pesada).
- ✓ O decréscimo em E_c , provoca um aumento na corrente da armadura I_a (Eq. 4-1).
- ✓ Uma pequena redução no fluxo polar produz um grande aumento na corrente de armadura.
- ✓ Na Eq. 5-8, o pequeno decréscimo do fluxo é contrabalançado pelo incremento na corrente de armadura
- ✓ Este aumento no torque produz um aumento na velocidade.

Desde que o torque determina a velocidade de uma máquina em operação, surge a dúvida se é possível aumentar o fluxo polar e a velocidade ao mesmo tempo. Isso será possível se a corrente de armadura for mantida constante. Isto é feito no servomotor de CC visto na Fig. 5-6, no qual a armadura está ligada a uma fonte de corrente constante. Quando se aplica uma tensão CC ao campo, desenvolve-se um torque e a armadura gira de acordo com a Eq. 5-8. Como a corrente é constante, o torque e a velocidade são proporcionais apenas ao fluxo polar. Deve-se observar que fluxo polar nulo produz uma velocidade nula e não infinita.

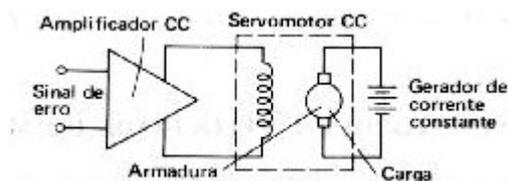


Fig. 5-6

Uma última questão que se levanta é: o que acontece se o circuito de campo de um motor-shunt carregado é subitamente desligado? Se a fonte fosse capaz de suprir uma corrente infinita e se as resistências dos alimentadores forem nulas tal abertura causará mais velocidade, mais carga, mais corrente na armadura, mais torque e, conseqüentemente, mais velocidade. A velocidade no motor irá tender a infinito e o motor será destruído pelas forças centrífugas atuantes nos seus condutores de armadura. Mas as linhas de alimentação possuem resistência, as fontes de tensão são limitadas e o motor estará protegido por disjuntores ou fusíveis para evitar danos devido corrente excessiva na armadura.

5.5- Dispositivos de Partida

No instante em que se aplica a tensão V_a nos terminais da armadura, para iniciar a rotação do motor, não existe f_{cem} , já que a velocidade é nula. Os fatores que limitam a corrente são a queda de tensão nos contatos das escovas e a resistência no circuito da armadura, R_a , sendo que estes fatores não alcançam 10 ou 15% da tensão aplicada através dos terminais da armadura. Essa sobrecarga é, às vezes, muito maior que a corrente nominal. Para evitar danos ao motor, se faz necessário o uso de um dispositivo de partida, que irá limitar a corrente de partida.

A corrente é excessiva devido à falta da f_{cem} na partida. À medida que se inicia a rotação, a f_{cem} cresce proporcionalmente ao aumento da velocidade. Logo, se quer um dispositivo cuja resistência R_s possa ser continuamente reduzida até que o motor entre em estado de operação normal. Então, a corrente de armadura será dada pela equação:

$$I_a = \frac{V_a - (E_c + BD)}{R_a + R_s} \quad (\text{Eq. 5-13})$$

Os motores-shunt e compostos têm sua partida efetuada com excitação plena de campo, para desenvolver o máximo torque de partida. Em todos os tipos de máquinas, a corrente de partida é limitada por um resistor de partida variável, de elevada dissipação, ligado em série com a armadura. Na prática, a corrente de partida é limitada a um valor mais alto que o da corrente nominal para desenvolver um grande torque de partida, especialmente nos grandes motores que possuem grande inércia e custam a acelerar.

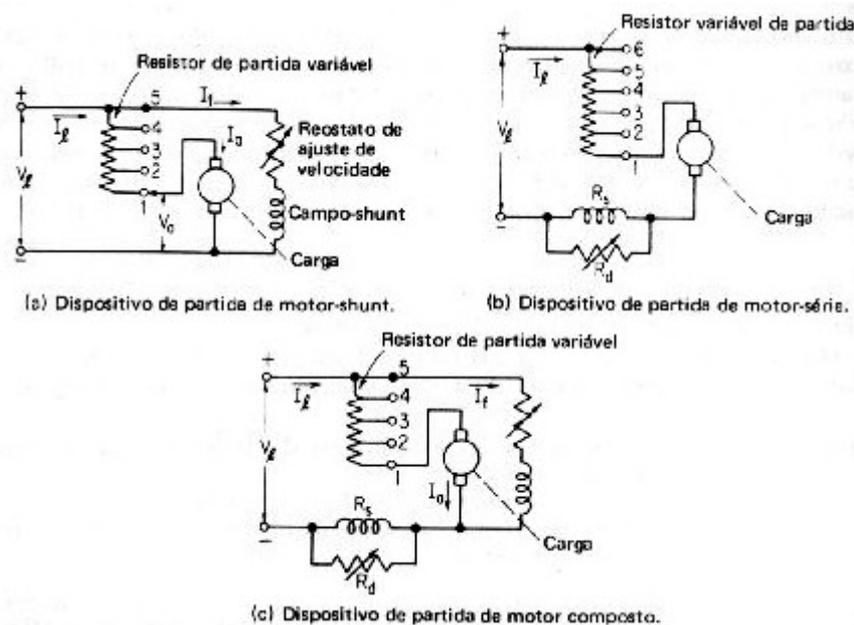


Fig. 5-7

Para controlar a partida nos motores, o terminal que liga a resistência ao motor é deslocado continuamente de forma a reduzir a resistência à medida que a f_{cem} aumenta. Se o terminal não for deslocado, a velocidade se estabilizaria num valor bem abaixo do valor nominal. Logo, o terminal é

deslocado até que a velocidade seja a nominal e o sistema não precise de uma resistência em série na armadura.

Observa-se que todos os três tipos de motores (série, shunt e composto) devem fazer a partida com uma carga mecânica acoplada e observa-se que, com a carga, a aceleração será mais lenta do que sem a carga. O motor-série nunca deve partir sem carga, mas os motores shunt e compostos podem partir com ou sem carga. Os motivos para tal afirmação serão justificados adiante.

5.6- Torque em Cada Tipo de Motor CC

A Eq. 5-8 permite que se possa definir como torque para cada tipo de motor da Fig. 5-7 variará com a aplicação da carga. Para a discussão a seguir, deve-se supor que cada tipo de motor teve sua partida realizada sem problemas e foi acelerado até que se retirasse toda a resistência relativa ao dispositivo de proteção para a partida. Será analisado cada tipo de motor CC em relação à sua resposta com um aumento de carga.

A Fig. 5-8 mostra um gráfico comparativo entre os tipos de motores CC, contendo uma relação entre corrente na armadura e torque do motor.

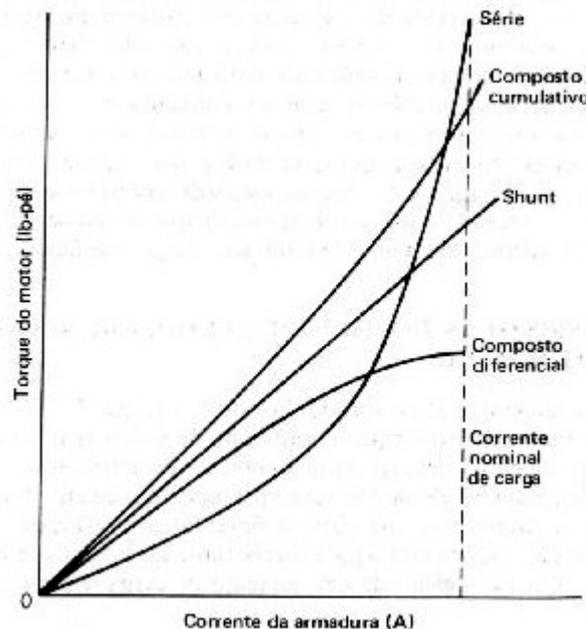


Fig. 5-8

5.6.1- Motor-Shunt

Durante a partida e funcionamento normal, a corrente no circuito do campo-shunt é essencialmente constante para um valor estabelecido para o reostato de campo e o fluxo é também essencialmente constante. Aumentando-se a carga mecânica, a velocidade diminui, causando uma diminuição na f_{cem} e um aumento na corrente da armadura.

Dessa forma, o torque pode ser expresso como uma relação linear de I_a :

$$T = k' \cdot I_a \quad (\text{Eq. 5-14})$$

5.6.2- Motor-Série

No motor-série, a corrente de armadura e a corrente do campo-série são as mesmas (ignorando os efeitos da resistência shunt de controle) e o fluxo produzido pelo campo-série é, em todo instante, proporcional à corrente de armadura. A equação para o torque do motor série é:

$$T = k'' \cdot I_a^2 \quad (\text{Eq. 5-15})$$

Desde que o núcleo polar seja não-saturado, a relação entre o torque do motor-série e a corrente de carga é exponencial. Para cargas extremamente leves, o torque do motor-série é menor que o torque do motor-shunt, porque desenvolve menor fluxo. Para uma mesma corrente numa armadura a plena carga, o seu torque é maior.

5.6.3- Motores Compostos

Quando se combinam enrolamentos de campo série e shunt o efeito do campo-série poderá ser composto cumulativo ou diferencial. No composto cumulativo, o fluxo do campo-série se soma ao fluxo do campo-shunt e, no caso do motor composto diferencial, há um antagonismo entre os campos. A corrente no circuito campo-shunt e o fluxo polar, durante a partida ou funcionamento normal, são constantes. A corrente no campo-série é uma função da corrente de carga solicitada pela armadura.

Para o motor cumulativo, a equação para o torque é:

$$T = k \cdot (\phi_f + \phi_s) \cdot I_a \quad (\text{Eq. 5-16})$$

onde o fluxo do campo série ϕ_s é função da corrente da armadura I_a .

Partindo com fluxo igual ao do campo-shunt sem carga e que aumente com a corrente da armadura, o motor composto cumulativo produz uma curva de torque que é sempre mais elevada que a do motor-shunt para a mesma corrente da armadura, conforme se pode observar na Fig. 5-8.

Para o motor composto diferencial a equação de torque é

$$T = k \cdot (\phi_f - \phi_s) \cdot I_a \quad (\text{Eq. 5-17})$$

onde ϕ_s é função de I_a e ϕ_f é constante. Partindo-se com fluxo igual ao fluxo do campo-shunt sem carga, qualquer valor da corrente da armadura produzirá um fluxo magnético do campo série que reduzirá o fluxo total no entreferro e, conseqüentemente, o torque. Assim, o motor composto diferencial produz uma curva que é sempre menor que a do motor shunt, conforme se pode também observar na Fig. 5-8.

5.7- Velocidade em Cada Tipo de Motor CC

A equação fundamental da velocidade, Eq. 5-11, em que $N = \left(\frac{V_a - I_a \cdot R_a}{k \cdot \phi} \right)$, permite que se possa determinar como cada a velocidade de cada um dos tipos de motores CC variará com a carga que suporta. Para simplificar, admitiremos que a os contatos das escovas não consomem potência.

5.7.1- Motor-Shunt

Se o motor-shunt da Fig. 5-7a atingir a velocidade nominal e estiver operando sem carga, o fluxo polar do motor (ignorando a reação da armadura) pode ser considerado constante e a velocidade do motor pode ser expressa em função da equação básica da velocidade:

$$N = \frac{E}{k' \cdot \phi_f} = k \cdot \left(\frac{V_a - I_a \cdot R_a}{\phi_f} \right) \quad (\text{Eq. 5-18})$$

Quando uma carga mecânica é aplicada ao eixo do motor, a f_{cem} decresce e a velocidade cai proporcionalmente. Mas, como a f_{cem} desde a vazia até a plena carga sofre uma variação de 20% (de $0,95 \cdot V_a$ a $0,75 \cdot V_a$), a velocidade do motor é essencialmente constante, como se vê na Fig. 5-9.

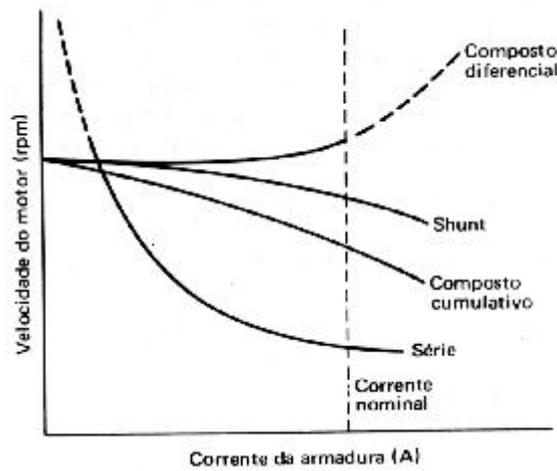


Fig. 5-9

5.7.2- Motor-Série

A equação básica da velocidade, Eq. 5-11, modificada para o motor-série é:

$$N = \frac{V_a - I_a \cdot (R_a + R_s)}{k \cdot \phi} \quad (\text{Eq. 5-19})$$

onde V_a é a tensão aplicada aos terminais do motor; e, como o fluxo no entreferro produzido pelo campo-série é proporcional apenas à corrente da armadura, a velocidade pode ser escrita como

$$N = K' \cdot \frac{V_a - I_a \cdot (R_a + R_s)}{I_a} \quad (\text{Eq. 5-20})$$

A Eq. 5-20 nos dá uma indicação da característica carga-velocidade de um motor-série. Se uma carga mecânica relativamente pequena é aplicada ao eixo da armadura de um motor série, a corrente da armadura I_a é pequena, fazendo com que o numerador da fração na Eq. 5-20 seja grande e o denominador pequeno, resultando numa elevada velocidade não usual. Sem carga, portanto, com pequena corrente na armadura e pequeno fluxo polar, a velocidade é excessivamente elevada. Por esta razão, o motor-série é sempre operado acoplado ou engrenado com uma carga, como guindastes, elevadores ou serviço de tração em CC nos trens. Com o aumento da carga, contudo, o

numerador da fração na Eq. 5-20 diminui mais rapidamente do que aumenta o denominador (o numerador decresce na razão do produto de I_a , comparando com o denominador que aumenta diretamente com I_a), e a velocidade cai rapidamente, como se vê na Fig. 5-9. A linha tracejada representa a porção da característica associada a cargas extremamente leves, situação em que não se costuma usar os motores-série.

Como se vê na Fig. 5-9, a velocidade excessiva para um motor-série não resulta numa corrente tão elevada na armadura, que seja capaz de abrir um fusível ou um disjuntor, desligando, deste modo, a armadura da rede (o que ocorre nos motores-shunt e compostos). Portanto, deve-se usar um outro processo para a proteção contra o disparo do motor. Os motores-série são usualmente equipados com chaves centrífugas, que são dispositivos sensíveis à força centrípeta e que são fechadas em operação normal e se abrem a velocidades 150% acima do valor nominal.

5.7.3- Motores Compostos

5.7.3.1- Motor Composto Cumulativo

A equação básica da velocidade para um motor composto cumulativo pode ser escrita como

$$N = K \cdot \left[\frac{V_a - I_a \cdot (R_a + R_s)}{\phi_f + \phi_s} \right] \quad (\text{Eq. 5-21})$$

ainda mais simplificada para

$$N = K \cdot \left(\frac{E}{\phi_f + \phi_s} \right) \quad (\text{Eq. 5-22})$$

Comparando a Eq. 5-22, para o motor composto cumulativo, com a equação $N = \frac{K \cdot E}{\phi_f}$, para

o motor-shunt, é evidente que, com o aumento da carga e da corrente da armadura, o fluxo produzido pelo campo-série também aumenta, enquanto a *fcm* decai. O denominador da equação cresce, enquanto que o numerador decresce proporcionalmente mais do que no motor-shunt. O resultado é que a velocidade de um motor composto cumulativo cairá numa razão maior do que a velocidade do motor-shunt com a aplicação da carga, como podemos observar na Fig. 5-9.

5.7.3.1- Motor Composto Diferencial

A Eq. 5-22 para o motor composto cumulativo pode ser modificada levemente para mostrar a oposição causada pela tensão gerada pelo campo-série, de modo que a velocidade será

$$N = K \cdot \left(\frac{E}{\phi_f - \phi_s} \right) = k \cdot \frac{V_a - I_a \cdot (R_a + R_s)}{\phi_f - \phi_s} \quad (\text{Eq. 5-23})$$

Com o aumento da carga e de I_a , o numerador da fração na Eq. 5-23 decresce um pouco, mas o denominador decresce mais rapidamente. A velocidade pode cair ligeiramente para cargas leves, mas, com o aumento da carga, a velocidade aumenta. Esta condição estabelece uma instabilidade dinâmica. Com o aumento da velocidade, a maioria das cargas mecânicas aumenta automaticamente (pois maior trabalho é executado em velocidades mais elevadas) causando um

aumento na corrente, um decréscimo no fluxo total e uma velocidade mais elevada, produzindo, assim, mais carga. Devido a essa instabilidade inerente, os motores compostos diferenciais raramente são usados em aplicações práticas. Inclusive, podem até haver casos em que ocorre uma inversão no sentido de rotação do motor. Isto pode ser explicado com a Eq. 5-23, que permite perceber que uma corrente elevada na partida do motor gera um ϕ , elevado, que pode ultrapassar o fluxo do campo-shunt, fazendo com que o motor inverta sua rotação.

A Fig. 5-10 mostra as relações torque-carga e velocidade-carga para motores CC suportando sua carga nominal.

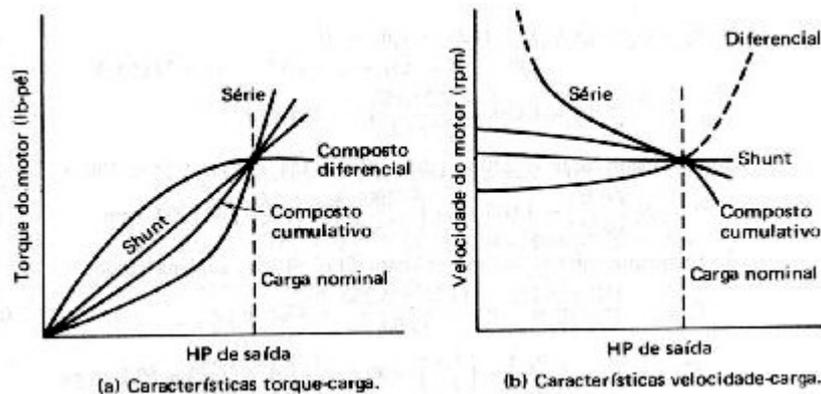


Fig. 5-10

5.8- Regulação de Velocidade

A regulação de velocidade de um motor é definida por norma internacional como: *a variação da velocidade desde a plena carga até a situação de carga nula, expressa em percentagem da velocidade nominal*. A equação que descreve esta definição é:

$$\text{regulação percentual da velocidade} = \frac{N_o - N}{N} \cdot 100\% \quad (\text{Eq. 5-24})$$

Observando as curvas da Fig. 5-10b, podemos concluir que os motores-shunt podem ser considerados como motores de velocidade praticamente constante e, portanto, com boa regulação de velocidade (pequena percentagem). A regulação de velocidade do motor composto é mais pobre, já que a percentagem é maior. A regulação de velocidade do motor-série é extremamente pobre, já que a situação sem carga gera uma velocidade que tende ao infinito. Os motores-série e compostos cumulativos são considerados motores de velocidade variável. O motor composto diferencial possui regulação de velocidade negativa, devido a uma instabilidade de carga.

5.9- Torque Externo, HP e Velocidade Nominais

Podemos notar que a comparação entre tipos de motores CC feita na Fig. 5-10 diz respeito à potência de saída, que é a capacidade que os motores têm em realizar trabalho mecânico. Porém, para efeitos de dimensionamento de motores ou de escolha de motores para aplicação numa determinada situação, pode ser melhor expressar a capacidade de torque que o motor pode exercer para executar trabalho útil na sua velocidade nominal.

$$HP = \frac{T.N}{5252} \quad (\text{Eq. 5-25})$$

onde HP é a potência útil do motor em HP

T é o torque interno ou externo em lbf.pé

N é a rotação do motor em rpm

5.10- Invertendo o Sentido da Rotação

Para inverter o sentido de rotação de qualquer motor CC, é necessário inverter o sentido da corrente na armadura em relação ao sentido do campo magnético. Para o motor-shunt e para o motor-série, basta invertermos o circuito da armadura em relação ao circuito que gera o campo ou vice-versa (o mais comum é inverter o circuito da armadura). A inversão de ambos manterá o mesmo sentido de rotação.

Podem parecer que, devido ao fato de a corrente de campo ser maior do que a corrente na armadura, seria melhor inverter o sentido de rotação pela inversão do circuito de campo. Contudo, o mais comum é que se projetem motores em que a inversão no sentido de rotação seja obtida através da inversão do circuito de armadura pois:

- ✓ Os circuitos de campo são circuitos altamente indutivos, o que implica em *fem* induzidas muito elevadas ao executarmos o chaveamento, o que pode causar desgaste prematuro dos contatos das chaves.
- ✓ Se o campo-shunt é invertido, o campo-série também o deve ser, senão o motor composto cumulativo irá se tornar um motor composto diferencial.
- ✓ As conexões do circuito da armadura estão naturalmente disponíveis por motivos de regeneração e frenagem, de modo que podemos aproveitá-las para executar a inversão.

No caso de motores compostos, a inversão apenas das conexões da armadura provoca a inversão no sentido de giro do motor tanto para as ligações longas, como para as curtas, como podemos perceber na Fig. 5-11, sem precisar mudar o sentido da corrente nos enrolamentos de campo.

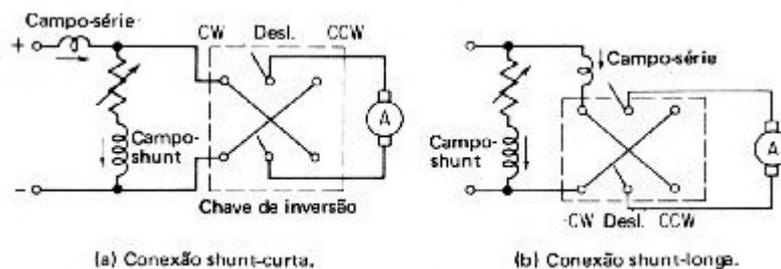


Fig. 5-11

6- Rendimento dos Motores de CC

Independentemente do fato de a máquina CC funcionar como gerador ou como motor, suas perdas rotacionais podem ser determinadas fazendo-a funcionar como motor sem qualquer carga mecânica (a vazio), com sua velocidade nominal e com uma tensão aplicada à armadura, onde essa tensão deve corresponder à f_{cem} induzida (motor) ou gerada (gerador) em plena carga. A tensão nos terminais CC (V_t) deve ser, neste caso, ajustada à f_{cem} em plena carga, já que queremos determinar o rendimento de um motor. Veja a Fig. 6-1.

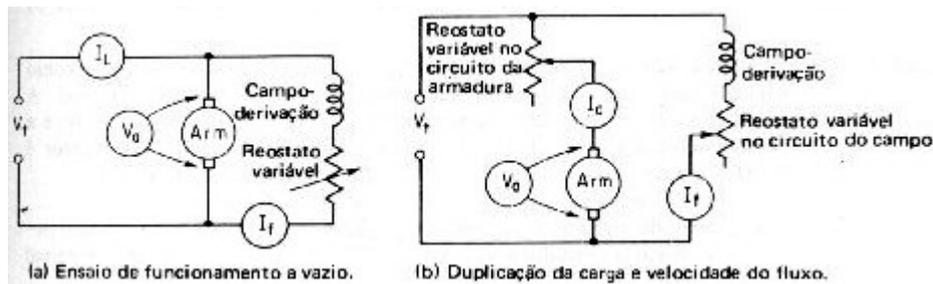


Fig. 6-1

Fazer uma máquina funcionar como motor a vazio significa não retirar potência mecânica nenhuma. Se a potência elétrica de entrada for medida e forem computadas as perdas elétricas, a diferença entre a potência elétrica total e as perdas elétricas deve representar as perdas mecânicas rotacionais do motor à velocidade nominal. Assim, teremos a seguinte equação:

Perdas rotacionais = Potência elétrica de entrada – Perdas elétricas = Potência elétrica de entrada – (Perdas no circuito do campo + Perdas combinadas no circuito da armadura)

$$\text{Perdas rotacionais} = V_a I_L - (V_a I_f + I_a^2 R_a)$$

$$\text{Perdas rotacionais} = V_a (I_L - I_f) - I_a^2 R_a$$

$$\boxed{\text{Perdas rotacionais} = V_a I_a - I_a^2 R_a} \quad (\text{Eq. 6-1})$$

Em geral, as perdas elétricas na armadura são tão pequenas em relação à potência total fornecida que a potência extraviada pode ser calculada somente pelo produto $V_a I_a$.

7- Quadro Comparativo de Motores de CC

Tipo	Binário de Arranque	Velocidade	Utilização
Excitação separada	Fraco	Constante	Rodar
Série	Elevado	Variável (embala em vazio)	Aparelhos Elevatórios Tração mecânica
Shunt	Fraco	Constante	Máquinas de Ferramentas
Composto Cumulativo	Elevado	Pouco variável	Aparelhos Elevatórios
Composto Diferencial	Fraco	Constante	Máquinas de Ferramentas Máquinas de tecidos

8- Avarias Típicas de um Motor de CC

Qualquer máquina de corrente contínua, em funcionamento permanente ou não, fica sujeita a que surjam algumas avarias.

8.1- Produção de Faíscas entre o Comutador e as Escovas

As escovas podem estar em má posição ou o contacto com o comutador pode ser defeituoso; a sua qualidade pode ser má ou a montagem no porta-escovas pode não ser a mais correta, podendo também ser um problema da mola que pressiona a escova contra o comutador. Como o comutador necessita de um ajuste perfeito com as escovas, se existir neste um mau estado de conservação, por exemplo sujo e com irregularidades ou com micas salientes, pode haver produção de faíscas. Além disso, uma outra situação que pode influenciar as faíscas é o caso das bobinas indutoras se encontrarem em curto-circuito. Também pode acontecer que as bobinas dos pólos auxiliares estejam com defeito na ligação, portanto mal ligados ou em curto-circuito. O curto-circuito no indutor e a inadequada ligação das bobinas do induzido às lâminas do comutador podem também provocar faíscas. Se houver falta de isolamento entre as lâminas do comutador pode-se provocar um curto-circuito que mais uma vez pode ser a causa das ditas faíscas que surgem. A sobrecarga e a velocidade excessiva também influenciam o aparecimento deste fenómeno.

8.2- Aquecimento Anormal dos Órgãos do Motor

8.2.1- Aquecimento do Induzido

Este aquecimento pode ser provocado pela sobrecarga ou pelo curto circuito, sendo também de se considerar as perdas exageradas por histereses e pelas correntes parasitas ou correntes de Foucault ou ainda defeitos de fabricação. Como a máquina, quando está em funcionamento, é considerada um todo, se houver aquecimento de outros órgãos da máquina, este aquece, como consequência. O defeito de isolamento em relação à carcaça devido à umidade ou o curto circuito entre espiras ou entre as extremidades das espiras provoca uma redução brusca da resistência do circuito fazendo elevar a sua temperatura.

8.2.2- Aquecimento do Indutor

A corrente de excitação que passa nas bobinas indutoras quando excessivas provoca um aquecimento. Quando a temperatura começa a ser preocupante, pode provocar quebras no isolamento (derretendo o verniz que isola espiras entre si).

8.2.3- Aquecimento do Comutador

O aquecimento do comutador pode ser provocado pela pressão exagerada das escovas ou pela defeituosa colocação das mesmas em relação ao comutador ou um mau dimensionamento das escovas para o comutador em questão. A sobrecarga e o mau isolamento entre as lâminas do comutador devido à sujeira também são fatores que influenciam o aumento de temperatura.

8.2.4- Aquecimento dos Apoios

Se a máquina tiver em funcionamento e lubrificação não for efetuada regularmente e de uma forma eficaz, ou por qualquer motivo o óleo que se destinava à lubrificação estiver em falta ou ainda se estiver em mau estado ou impróprio, ou também é possível que os anéis de lubrificação estejam em mau funcionamento ou defeituosos, assim a máquina começa a girar comprimindo *ferro com ferro*, provocando um aquecimento. Se o sistema a que o motor está ligado não for adequado para as suas características, ele fica sujeito a uma tensão excessiva, tendo também como consequência um aquecimento exagerado.

8.3- Motor Não Arranca

Caso o motor não arranque, deve-se verificar se existe falta de tensão e se o circuito elétrico até ao motor se encontra em pleno estado de conservação e de funcionamento. No entanto, deve-se verificar se o reostato de arranque está em perfeito estado de funcionamento e se não possui nenhuma interrupção no seu circuito elétrico, podendo também existir erros de ligação do reostato. Um outro motivo pelo qual o motor pode não arrancar deve-se à interrupção ou curto-circuito nos enrolamentos indutores ou à má posição das escovas. No caso de existir um defeituoso isolamento do motor, ele poderá também não funcionar.

8.4- Funcionamento ruidoso

O funcionamento ruidoso do motor pode dever-se a um curto-circuito ou à falta de carga que poderá levar o motor a atingir velocidades muito elevadas. A sobrecarga, o mau estado do comutador e das escovas, o choque do induzido contra as peças polares, o induzido desequilibrado, defeitos nos apoios do veio, parafusos desapertados, rolamentos mal lubrificados e defeitos no acoplamento da correia de transmissão são fatores que farão, certamente, com que o motor funcione de uma forma ruidosa.

9- Dicas de Manutenção

- ✓ Evitar um funcionamento prolongado, a fim de evitar um aquecimento nas bobinas, que pode provocar um curto-circuito devido ao verniz que serve como isolante entre espiras ter derretido com o calor.
- ✓ A lubrificação dos rolamentos deve ser constante e adequada evitando, assim, o aquecimento destas peças.
- ✓ A limpeza e a verificação do estado do comutador também devem ser feitas pelo menos uma vez por ano.
- ✓ A inspeção das escovas, bem como das molas dos porta-escovas deve ser feita cuidadosamente a fim de mantê-las em ótimo estado.
- ✓ Devem-se manter todas as peças do motor bem limpas, evitando a acumulação de pó que, juntamente com a umidade, poderia provocar um curto-circuito.
- ✓ Todo o material isolante exterior é em alumínio tendo como grande vantagem a dissipação do calor.
- ✓ Todas as peças são substituíveis, o que quando realizada uma manutenção planeada e eficaz poderá prolongar em muitos anos a vida deste motor.

10- Exemplos

10.1- Cálculo de f_{cem} Entre Escovas

Calcular (a) a f_{cem} média entre as escovas de um motor de CC e (b) a tensão aplicada, requerida para vencer a f_{cem} e a resistência da armadura.

Dados:

40 condutores ligados em 2 caminhos paralelos

O fluxo por pólo é de $6,48.10^8$ linhas

A velocidade é de 30 rpm

A resistência de cada condutor é de 0,01 ohm

Capacidade condutora de 10 A

(a)

$$E_c = \left(\frac{\phi \cdot Z \cdot N \cdot P}{60 \cdot a} \right) 10^{-8} V = \left(\frac{2.6,48.10^8 \text{ linhas}}{4 \text{ pólos}} \right) \left(\frac{40 \text{ cond}}{4 \text{ cam}} \right) \left(\frac{30 \text{ rpm}}{60 \text{ seg / min}} \right) 4 \text{ pólos} \cdot 10^{-8} V = 64,8V$$

$$(b) V_t = E_c + I_a \cdot R_a = 64,8V + 40A \cdot 0,025\Omega = 65,8V$$

10.2- Cálculo de Torque Mecânico

A armadura de um motor CC contém 700 condutores e tem um diâmetro de 24 polegadas, além de um comprimento axial de 34 polegadas. Se 70% dos condutores estão diretamente sobre os pólos, com uma densidade de fluxo de 50.000 linhas por polegada quadrada e com uma corrente de 25 A, calcular (a) a força total média, que tende a girar a armadura e (b) o torque da armadura.

$$(a) F_{méd} = F_c \cdot Z_a = \left(\frac{50000 \cdot 25 \cdot 34}{1,13 \cdot 10^7} \right) (700 \cdot 0,7) = 1860 \text{ lbf}$$

$$(b) T_{méd} = F_{méd} \cdot r = 1860 \text{ lbf} \cdot 1 \text{ pé} = 1860 \text{ lbf} \cdot \text{pé}$$

10.3- Cálculo de Corrente de Armadura

Calcule a corrente de armadura de um motor que possui as seguintes especificações: 120 ranhuras, 6 condutores por ranhura, densidade de fluxo de 60.000 linhas por polegada quadrada, diâmetro de armadura de 28 polegadas, 14 polegadas no comprimento axial, 4 caminhos em paralelo na armadura, os arcos polares abraçam 72% da superfície da armadura e o torque desenvolvido pela armadura é de 1.500 lbf.pé.

$$F_{méd} = \frac{I_{méd}}{r} = \frac{1500 \text{ lbf} \cdot \text{pé}}{14 \text{ pol}} \cdot 12 \frac{\text{pol}}{\text{pé}} = 1285 \text{ lbf}$$

$$\frac{I_a}{\text{cond}} = \frac{I_a}{\text{ca min ho}} = \frac{F_{\text{méd}} \cdot 1,13 \cdot 10^7}{B \cdot l \cdot Z_a} = \frac{1285 \cdot 1,13 \cdot 10^7}{60000 \cdot 14 \cdot (120 \cdot 6 \cdot 0,72)} = 33,4 \text{ A / ca min ho}$$

$$I_a = 33,4 \text{ ca min hos} = 133,6 \text{ A}$$

10.4- Cálculo de Velocidade

Um motor-shunt CC, 120 V, possuindo uma resistência do circuito de armadura de 0,2 ohm e uma resistência de 60 ohms no circuito de campo, absorve da rede uma corrente de linha de 40 A a plena carga. A queda de tensão nas escovas na situação nominal é de 3 V, a velocidade a plena carga é 1.800 rpm. Calcule (a) a velocidade num situação de meia carga e (b) a velocidade num sobrecarga de 125%.

(a) a plena carga

$$I_a = I_l - I_f = 40 \text{ A} - \frac{120 \text{ V}}{60 \Omega} = 38 \text{ A}$$

$$E_c = V_a - (I_a \cdot R_a + BD) = 120 - (38 \cdot 0,2 + 3) = 109,4 \text{ V}$$

para a situação de meia carga

$$I_a = \frac{38 \text{ A}}{2} = 19 \text{ A}$$

$$E_c = V_a - (I_a \cdot R_a + BD) = 120 - (19 \cdot 0,2 + 3) = 113,2 \text{ V}$$

$$N = N_{\text{orig}} \frac{E_{\text{final}}}{E_{\text{orig}}} = 1800 \cdot \frac{113,2}{109,4} = 1860 \text{ rpm}$$

(b) para 1,25 de carga nominal

$$I_a = \frac{38 \text{ A}}{0,8} = 47,5 \text{ A}$$

$$E_c = V_a - (I_a \cdot R_a + BD) = 120 - (47,5 \cdot 0,2 + 3) = 107,5 \text{ V}$$

$$N = N_{\text{orig}} \frac{E_{\text{final}}}{E_{\text{orig}}} = 1800 \cdot \frac{107,5}{109,4} = 1765 \text{ rpm}$$

10.5- Cálculo de Corrente de Partida

Um motor-shunt CC de 120 V possui uma resistência de armadura de 0,2 ohms e uma queda de tensão de 2V no contato das escovas. A corrente nominal a plena carga é de 75 A. Calcule a corrente no instante da partida e o seu percentual em relação à corrente nominal.

$$I_{st} = \frac{I_a - BD}{R_a} = \frac{120 - 2}{0,2} = 590 \text{ A}$$

$$\text{Porcentagem} = \frac{590A}{75A} \cdot 100\% = 786\%$$

10.6- Cálculo de Potência

Um motor composto de 10 HP, 230 V e 1.250 rpm tem uma resistência de armadura de 0,25 ohms, um enrolamento combinado de compensação e interpolos com resistência de 0,25 ohms, além de ter 5V de queda de tensão nos contatos das escovas. A resistência do campo-série é de 0,5 ohms e a resistência do campo-shunt é de 230 ohms. Quando ligado como motor-shunt, a corrente de linha na situação nominal é de 55 A e a corrente de linha a vazio é de 4 A. A velocidade sem carga é de 1.810 rpm. Desprezando a reação da armadura na tensão especificada, calcule (a) a velocidade para a carga nominal e (b) a potência interna em W e em HP.

$$(a) I_a = I_l - I_f = 4A - 1A = 3A$$

$$E_c = V_a - (I_a \cdot R_a + BD) = 230 - (3 \cdot 0,5 + 5) = 223,5V$$

$$E_c = V_a - (I_a \cdot R_a + BD) = 230 - (54 \cdot 0,5 + 5) = 198V$$

$$N = 1810 \cdot \frac{198}{223,5} = 1600rpm$$

$$(b) P_d = E_c \cdot I_a = 198V \cdot 54A = 10700W = 14,35HP$$

10.7- Cálculo de Rendimento

Um gerador-derivação de 10 KW, 230 V e 1.750 rpm foi posto para funcionar como motor, a vazio, para determinar suas perdas rotacionais à carga nominal. A tensão aplicada aos terminais da armadura V_a , para o ensaio, foi de 245 V e a corrente solicitada pela armadura foi de 2 A. A resistência do campo do gerador é de 230 ohms e a resistência medida do circuito da armadura é de 0,2 ohms. Calcule (a) as perdas rotacionais (potência extraviada) a plena carga, (b) as perdas do circuito da armadura, a plena carga, e as perdas no campo e (c) o rendimento do gerador a $\frac{1}{4}$, $\frac{1}{2}$, $\frac{3}{4}$, 1 e $1 \frac{1}{4}$ da carga nominal.

$$(a) \text{Perdas} = V_a \cdot I_a - I_a^2 \cdot R_a = (245 \cdot 2) - (2^2 \cdot 0,2) = 489,2W$$

(b) à carga nominal

$$I_l = \frac{W}{V_t} = \frac{10000W}{230V} = 43,5A$$

$$I_a = I_f + I_l = \frac{230V}{230\Omega} + 43,5 = 44,5A$$

A perda na armadura a plena carga

$$I_a^2 \cdot R_a = (44,5)^2 \cdot 0,3 = 376W$$

A perda no campo

$$V_f \cdot I_f = 230V \cdot 1A = 230W$$

(c) O rendimento, a qualquer carga é

$$\eta = \frac{PotSaída}{PotTotal}$$

Rendimento a $\frac{1}{4}$ da carga nominal

$$\eta = \frac{10000 / 4}{1000 / 4 + 489,2 + [(376 / 16) + 230]} \cdot 100\% = 77\%$$

Rendimento a $\frac{1}{2}$ da carga nominal

$$\eta = \frac{10000 / 2}{1000 / 2 + 489,2 + [(376 / 4) + 230]} \cdot 100\% = 86,2\%$$

Rendimento a $\frac{3}{4}$ da carga nominal

$$\eta = \frac{10000 \cdot 0,75}{1000 \cdot 0,75 + 489,2 + [(376 \cdot (9 / 16)) + 230]} \cdot 100\% = 89\%$$

Rendimento à carga nominal

$$\eta = \frac{10000}{1000 + 489,2 + (376 + 230)} \cdot 100\% = 90,1\%$$

Rendimento a $1 \frac{1}{4}$ da carga nominal

$$\eta = \frac{10000 \cdot 1,25}{1000 \cdot 1,25 + 489,2 + [(376 \cdot (25 / 16)) + 230]} \cdot 100\% = 90,6\%$$

11- Conclusão

Após estudarmos o funcionamento e a constituição do motor elétrico, chegamos à conclusão de que este tipo de motor deve ser encarado com seriedade como uma das únicas opções para um futuro próximo. Isto pode ser afirmado pois a energia consumida por ele para gerar potência mecânica é limpa (isto é, não agride o meio ambiente) e relativamente barata. Isto representa uma grande vantagem sobre os motores de combustão interna, que, em geral, poluem.

O princípio de funcionamento do motor elétrico está fundamentado no eletromagnetismo, que é uma força de campo (não há necessidade de contato físico para gerar a força). Dessa maneira, os motores elétricos tendem a atingir altos níveis de rendimento pois pouca potência é perdida por atrito.

O custo de manutenção de um motor elétrico não é muito alto pois não há muito gasto com lubrificantes (exceto os dos mancais), já que não existem válvulas e nem pistões. A ausência de explosões (combustão) faz com que a poluição sonora (ruído) praticamente não exista. Esse fato também contribui para o bom rendimento, já que não teremos perdas de energia com o ruído.

Esperamos ter conseguido atingir todos os objetivos a que nos propomos na introdução deste trabalho e gostaríamos de dizer que, com certeza, ele contribuiu para enriquecer nosso conhecimento sobre esse assunto, que se apresenta como uma mescla de engenharia mecânica com engenharia elétrica. Isto é válido principalmente para aqueles que seguirão a área da eletrônica e, possivelmente, não estudarão muito a parte de motores.

12- Bibliografia e Fontes de Pesquisa

- ✓ GRAY, Alexander - *Electrical Machine Design* - McGraw Hill Book Company
- ✓ KOSOW, Irving I. - *Máquinas Elétricas e Transformadores* - Editora Globo
- ✓ MARQUES, Pedro Miguel - Internet: <http://www.terravista.pt/nazare/1878/>