



UNICAMP

FEM

Conexões da
MCC

Motor
universal

Estático

Dinâmico

Máquina de corrente contínua

PED(B): Cássio Fujisawa

Miguel Paredes

Curso: ES563 Laboratório de Máquinas Elétricas

Faculdade de Engenharia Mecânica
Universidade Estadual de Campinas - Unicamp

Campinas, abril de 2014



FEM

Conexões da
MCC

Motor
universal

Estático

Dinâmico

- ① Conexões da máquina de corrente contínua
- ② MCC: Conexão série
- ③ Circuito elétrico equivalente da MCC com imã permanente
- ④ Modelo dinâmico do MCC



Máquina de corrente contínua: Conexões

FEM

Conexões da
MCC

Motor
universal

Estático

Dinâmico

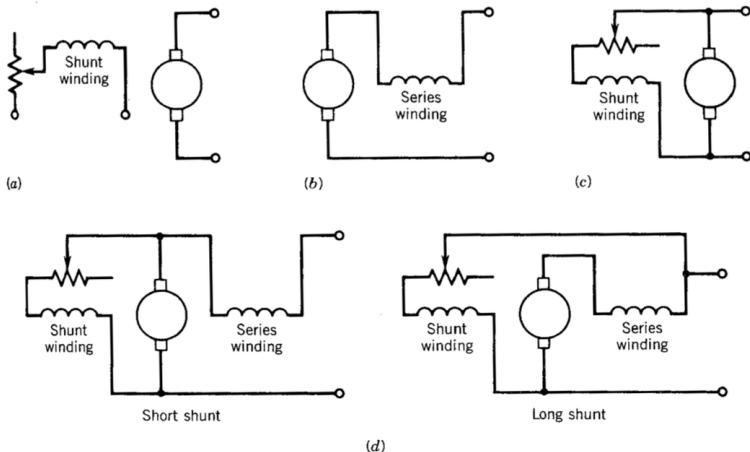


FIGURE 4.27 Different connections of dc machines. (a) Separately excited dc machine. (b) Series dc machine. (c) Shunt dc machine. (d) Compound dc machine.

MCC: Curvas das várias conexões do motor

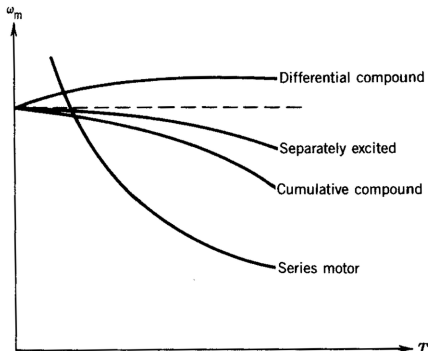


FIGURE 4.56 Torque–speed characteristics of different dc motors.

Motor série monofásico: Motor universal



FEM

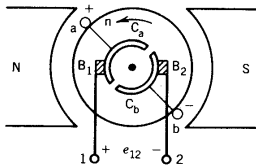
Conexões da
MCC

Motor
universal

Estático

Dinâmico

- Motor funciona em corrente CC ou CA;
- Em CA: precisa ser laminado apropriadamente para reduzir correntes parasitas;
- Em CA: o conjugado tem sempre o mesmo sentido, observa-se em (1), pois com a mudança do sentido da corrente, muda-se o sentido de i e de B ao mesmo tempo;



$$f = Bli \quad (1)$$

onde f é a força, B é a densidade de fluxo magnético, l é o comprimento do condutor e i é a corrente elétrica.



FEM

Conexões da
MCC

Motor
universal

Estático

Dinâmico

- Diferenças entre CC e CA:
 - Com correntes alternadas tem-se quedas de tensão nas reatâncias do campo e da armadura, reduzindo a força contra-eletromotriz rotacional e a velocidade;
 - Com CA pode haver saturação do circuito magnético devido os picos da onda de corrente, reduzindo o valor eficaz do fluxo e o conjugado;
- Muito utilizado em eletrodomésticos e ferramentas portáteis;



UNICAMP

FEM

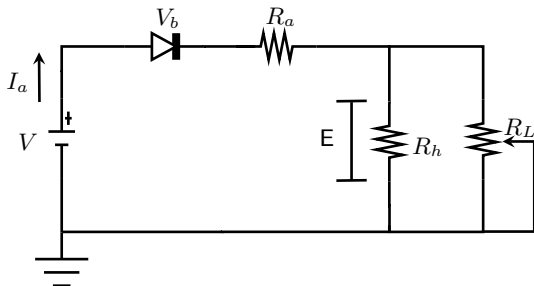
Conexões da
MCC

Motor
universal

Estático

Dinâmico

Circuito elétrico equivalente da MCC com imã permanente: modelo estático



V é a tensão terminal;

V_b é a queda de tensão nas escovas;

R_a é a resistência do enrolamento de armadura;

R_h é a resistência referente as perdas da máquina;

R_L é a resistência referente a carga;

E é a tensão induzida;



UNICAMP

FEM

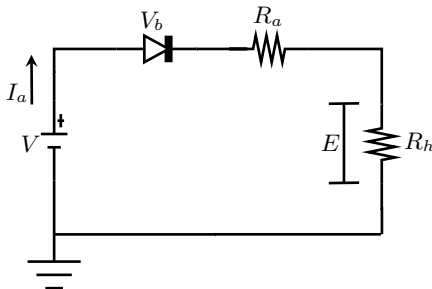
Conexões da
MCC

Motor
universal

Estático

Dinâmico

Obtenção dos parâmetros do modelo estático: ensaio em vazio



Sem carga $\rightarrow R_L = \infty$

$$V_0 = V_b + (R_a + R_h) I_{a0} \quad (2)$$

onde V_0 é a tensão terminal em vazio e I_{a0} é a corrente de armadura em vazio.



UNICAMP

FEM

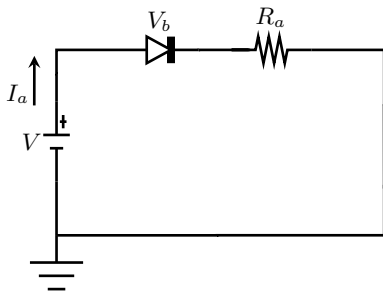
Conexões da
MCC

Motor
universal

Estático

Dinâmico

Obtenção dos parâmetros do modelo estático: ensaio com rotor travado



Com rotor travado $\rightarrow \omega = 0$

$$E = K_e \omega = K_e \cdot 0 \quad (3)$$

$$E = 0 \rightarrow R_h = 0 \quad (4)$$

$$V = R_a I_a + V_b \quad (5)$$

Obtenção dos parâmetros do modelo estático: ensaio com rotor travado

Obtendo alguns pontos com o rotor travado, tem-se uma reta de V em função de I_a :

$$V = \alpha \cdot I_a + \beta \quad (6)$$

onde α é o coeficiente angular da reta e β é o coeficiente linear.

Comparando (6) com (5), tem-se

$$R_a = \alpha \quad (7)$$

$$V_b = \beta \quad (8)$$

Com os parâmetros R_a e V_b calculados, pode-se obter R_h a partir de (2).



UNICAMP

FEM

Conexões da
MCC

Motor
universal

Estático

Dinâmico

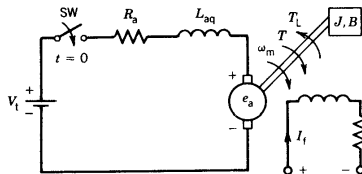
Obtenção dos parâmetros do modelo estático: cálculo de K_e

Para o ensaio em vazio, tem-se:

$$E_0 = K_e \omega_0 = R_h I_{a0} \quad (9)$$

Portanto,

$$K_e = \frac{R_h I_{a0}}{\omega} \quad (10)$$



Lei da malha de tensão:

$$V_t = e_a + R_a i_a + L_{aq} \frac{di_a}{dt} \quad (11)$$

sendo $e_a = K_m \omega_m$.

Transformada de Laplace:

$$V_t(s) = K_m \omega_m(s) + I_a(s) R_a (1 + s \tau_e) \quad (12)$$

onde $\tau_e = \frac{L_{aq}}{R_a}$ é a constante de tempo elétrica.



UNICAMP

FEM

Conexões da
MCC

Motor
universal

Estático

Dinâmico



FEM

Conexões da
MCCMotor
universal

Estático

Dinâmico

Equação do sistema mecânico:

$$T = K_m i_a = J \frac{d\omega_m}{dt} + B_m \omega_m + T_L \quad (13)$$

onde J é o momento de inércia da carga e do motor, B_m é o coeficiente de atrito e T_L é o torque mecânico.

Transformada de Laplace com ω_m isolado:

$$\omega_m(s) = \frac{K_m I_a(s) - T_L(s)}{B_m(1 + s\tau_m)} \quad (14)$$



FEM

Conexões da
MCC

Motor
universal

Estático

Dinâmico

Assumindo torque de carga proporcional a velocidade angular:

$$T_L = B_L \omega_m \quad (15)$$

Reescrevendo (13), tem-se:

$$T = K_m i_a = J \frac{d\omega_m}{dt} + B\omega_m \quad (16)$$

onde $B = B_m + B_L$.



FEM

Conexões da
MCCMotor
universal

Estático

Dinâmico

Equivalência entre dispositivos elétricos e mecânicos

A equivalência entre dispositivos elétricos e mecânicos baseiam-se em energia.

Representação da inércia do motor e da carga por capacitância:

$$\frac{1}{2}J\omega_m^2 = \frac{1}{2}Ce_a^2 \quad (17)$$

Sendo $e_a = K_m\omega_m$, tem-se:

$$C = \frac{J}{K_m^2} \quad (18)$$

Representação das perdas de energia do motor e da carga por resistência:

$$\frac{e_a^2}{R} = B\omega_m^2 \quad (19)$$

Fazendo a mesma substituição de e_a , tem-se:

$$R = \frac{K_m^2}{B} \quad (20)$$



UNICAMP

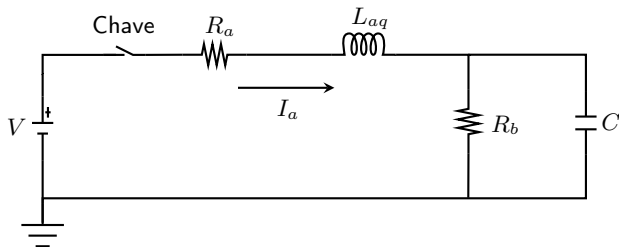
FEM

Conexões da
MCC

Motor
universal

Estático

Dinâmico



V é a tensão terminal;

R_a é a resistência do enrolamento de armadura;

L_{aq} é a indutância de armadura;

R_b é a resistência referente as perdas de energia;

C é a capacitância referente a inércia do motor e da carga;



FEM

Conexões da
MCC

Motor
universal

Estático

Dinâmico

A partir do circuito elétrico equivalente é possível obter a seguinte equação da corrente de armadura em função do tempo:

$$i_a(t) = \frac{V}{R_a + R_b} + \frac{VR_b}{R_a(R_a + R_b)}e^{-\left(\frac{t}{\tau_m}\right)} - \frac{V}{R_a}e^{-\left(\frac{t}{\tau_e}\right)} \quad (21)$$



UNICAMP

FEM

Conexões da
MCC

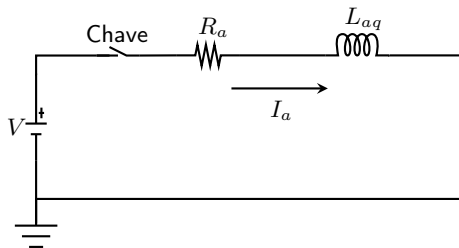
Motor
universal

Estático

Dinâmico

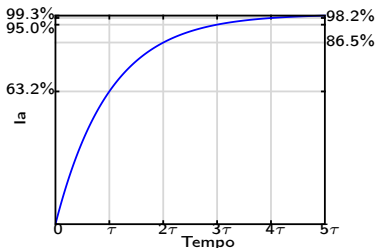
Obtenção do parâmetro τ_e : Ensaio com o rotor bloqueado

Assumindo $\omega_m = 0$, tem-se o seguinte circuito equivalente e a equação de corrente:



$$i_a(t) = \frac{V}{R_a} (1 - e^{-\frac{t}{\tau_e}}) \quad (22)$$

Realizando o ensaio com o rotor bloqueado e aplicando um degrau de tensão, obtém-se uma curva da corrente de armadura similar a essa curva:



A partir do valor da corrente em regime pode-se calcular 63,2% desse valor e com isso identifica-se a constante de tempo elétrica (τ_e) na curva. E calcula-se:

$$L_{aq} = \tau_e R_a \quad (23)$$



UNICAMP

FEM

Conexões da
MCCMotor
universal

Estático

Dinâmico

Obtenção do parâmetro τ_m : ensaio com motor com carga

- 1 Estima-se corrente de pico com rotor bloqueado (valor em regime): $I_{pico} = \frac{V}{R_a}$
- 2 Aplicando um degrau de tensão como entrada, mede-se o valor de corrente em regime (I_{reg}) e estima-se a resistência das perdas: $R_b = \frac{V}{I_{reg}} - R_a$
- 3 Para $t = \tau_m$, tem-se:

$$e^{\frac{-t}{\tau_e}} \approx 0 \quad (24)$$

$$I_a(\tau_m) = V \left[\frac{1}{R_a + R_b} + \frac{R_b}{R_a(R_a + R_b)} e^{-1} \right] \quad (25)$$

$$\gamma = \frac{I_a(\tau_m)}{I_{pico}} = \frac{R_a}{R_a + R_b} + \frac{R_b}{R_a + R_b} e^{-1} \quad (26)$$

- 4 Portanto, a corrente de armadura alcança o valor $\gamma \cdot I_{pico}$ no instante $t = \tau_m$, que pode ser obtido pela curva da corrente pelo tempo.

Obtenção do parâmetro τ_m : ensaio com motor com carga

5 A partir de τ_m , tem-se:

$$J = \tau_m \frac{(K_e^2 + R_a B)}{R_a} \quad (27)$$

$$C = \frac{J}{K_e^2} \quad (28)$$

$$B = \frac{K_e^2}{R_b} \quad (29)$$