

3.- PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO DO MOTOR DE CORRENTE CONTÍNUA

3.1 - FORMAÇÃO DO CONJUGADO MOTOR

Conforme já foi visto na introdução desta apostila, quando a máquina de corrente contínua opera como motor, o fluxo de potência é da rede de alimentação para o motor, ou seja, a máquina recebe potência elétrica e fornece potência mecânica no eixo.

No motor, a aplicação de uma tensão U_A ao circuito

de armadura e uma tensão U_E ao circuito de campo, determinam:

- a circulação de uma corrente de armadura I_A ;
- a produção de um fluxo magnético Φ a partir da corrente de campo I_E resultante de U_E .

Em decorrência da interação entre a corrente e o fluxo cria-se um conjugado mecânico (M) e, conseqüentemente, a rotação da máquina com velocidade n .

Estas grandezas relacionam-se segundo as condições estabelecidas por equações, que buscam refletir, matematicamente a condição para que haja o equilíbrio energético do sistema.

Da mesma forma que na operação como gerador, o fluxo " Φ " desenvolvido nos enrolamentos de excitação, corta os enrolamentos de armadura, sendo indispensável a sua presença para que haja a formação da chamada "Força Contra-Eletromotriz" (FCEM), tensão esta, responsável pela limitação da corrente no circuito da armadura.

A seguir, está mostrado na figura 17 o diagrama do conjunto para a operação como motor. A espira é percorrida pela corrente contínua I_A e em seus condutores, devido a ação do fluxo magnético, é desenvolvido o conjugado responsável pelo movimento da armadura (eixo) do motor.

Está mostrado na figura 18, o corte transversal desta espira em diversas posições em relação aos pólos (circuito de campo). O deslocamento da espira se dá devido ao conjugado desenvolvido em seus condutores.

Observa-se claramente na figura 18, que o valor médio do conjugado desenvolvido na espira, é nulo. Sempre que a espira cruza o plano ortogonal à direção do fluxo, que na figura em questão está representado pela denominada "Linha Neutra" (LN), há uma inversão no sentido do conjugado desenvolvido, o que inviabiliza a construção do motor conforme apresentado na figura 17.

A observação da figura 18, permite concluir que quando a espira ultrapassa a linha LN, deverá ser feita a inversão no sentido da corrente que circula pelo condutor da bobina, para que as forças desenvolvidas nos condutores continuem em resultar em um conjugado que mantenha o sentido de rotação. Deste modo, os enrolamentos do circuito da armadura deverão ser conectados ao circuito externo, através do comutador.

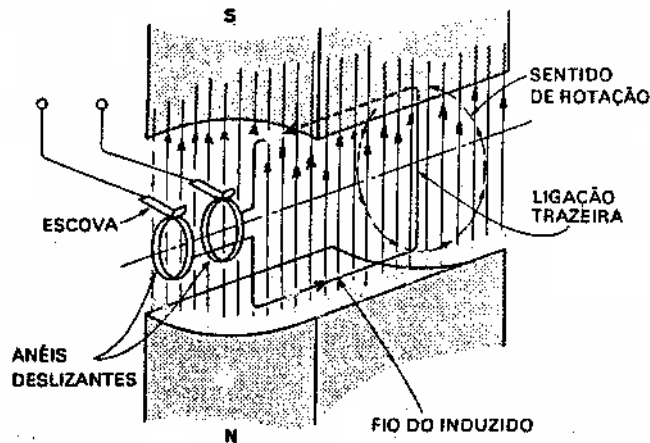


Figura A -Princípio de funcionamento do motor.

Agora, diferentemente do modo como o comutador atuava na máquina funcionando como gerador (o comutador operava como retificador), ele opera como um "inversor auto-controlado", pois a partir de uma tensão contínua aplicada por uma fonte externa, dá-se origem à circulação de uma corrente alternada nos enrolamentos da armadura.

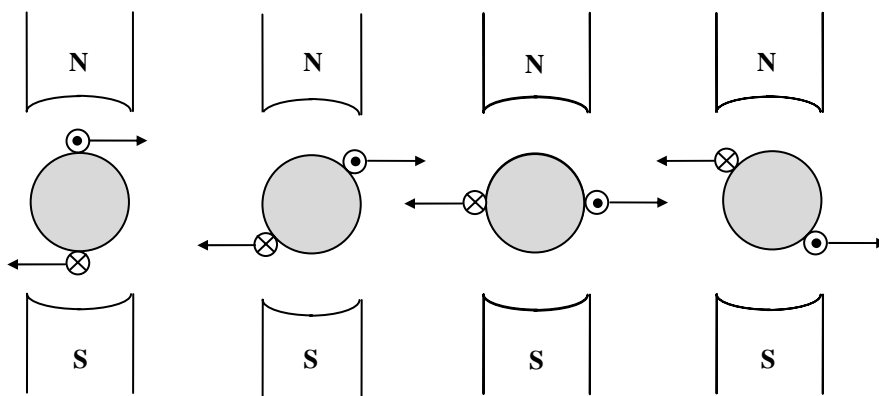


Figura 18 - Movimento da espira sob a ação da força desenvolvida devido ao fluxo Φ e a corrente I_A .

3.2 - EQUAÇÕES BÁSICAS DO MOTOR

Na figura 19, a seguir, está representado o circuito equivalente de um motor de corrente contínua com excitação independente. Como ocorre no gerador de corrente contínua, é aplicada a tensão de excitação U_E nos enrolamentos do campo, responsáveis pela produção do fluxo magnético, resultando, como consequência, a circulação da corrente de excitação I_E . Esta corrente é definida pela equação 13.

$$I_E = \frac{U_E}{R_E} \quad (13)$$

A corrente de excitação I_E produz o fluxo Φ . A relação entre essas duas grandezas é aquela que já foi mostrada na figura 16.

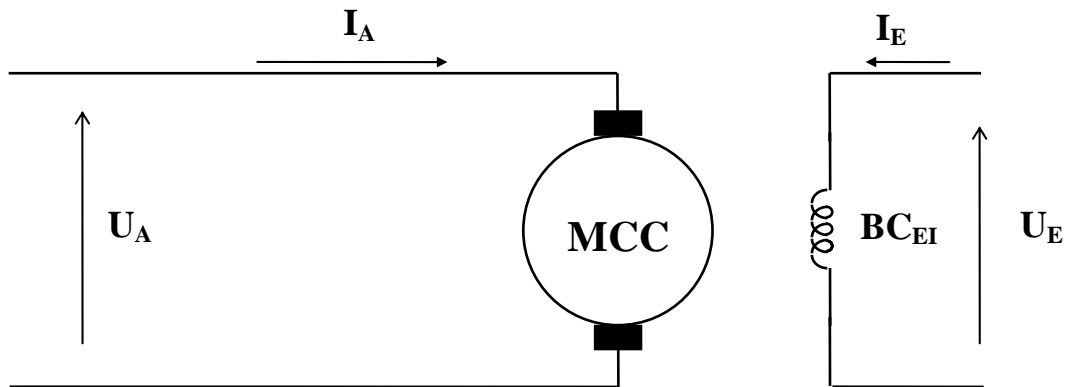


Figura 19 -Esquema básico de um motor de corrente contínua com excitação independente.

Quando se submete o circuito de armadura a um determinado valor de tensão, " U_A ", estando a máquina sem movimento de rotação, resulta na circulação de uma corrente de armadura designada por " I_A ". Como neste caso, apenas a resistência própria dos enrolamentos da armadura " R_A " limita a corrente I_A , a tensão aplicada na partida deve ser tal que não promova um valor inadmissível de corrente. Esta situação está representada analiticamente pela expressão a seguir:

$$U_{AP} = R_A \cdot I_{AP} \quad (14)$$

sendo:

- U_{AP} - valor inicial da tensão da armadura [V]
- R_A - resistência do circuito de armadura [ohm]
- I_{AP} - corrente admissível na partida [A].

O valor da corrente de partida pode ser determinado pelo motor ou pela carga. Como todos os equipamentos supridos por energia elétrica, o motor de corrente contínua tem um valor de corrente máximo admissível, que no caso em questão, é definido pela comutação. A magnitude desta corrente deve ser fornecida pelo fabricante e é definida como sendo a Corrente Limite " I_{LIM} ". Existem acionamentos onde a corrente de partida é definida pelo conjugado acelerador exigido podendo seu valor ficar abaixo do valor limite.

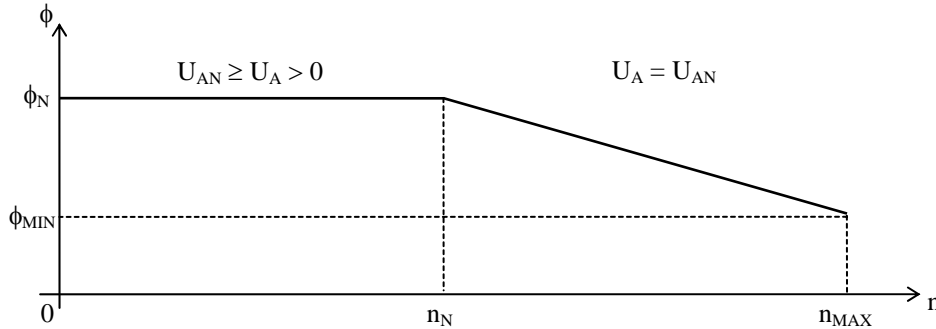
A tensão de partida U_{AP} pode ser determinada pela fonte caso seja um retificador controlado, ou através da inclusão de resistores em série com o circuito da armadura do motor. Neste caso, a tensão da fonte de alimentação é constante, obtendo-se:

$$U_A = (R_A + R_{EXT}) \cdot I_{AP} \quad (15)$$

Do mesmo modo como para a máquina operando como gerador, o conjugado motor desenvolvido é dado por:

$$M = K \cdot \Phi \cdot I_A \quad (16)$$

Conforme pode ser observado no gráfico a seguir, em motores de excitação independente o fluxo magnético é mantido constante no valor nominal para velocidades menores que a nominal. Nesta região de operação o controle de velocidade é exercido através da variação da tensão de armadura. Para que o acionamento opere com velocidades superiores à nominal, é necessário que o fluxo seja enfraquecido e a tensão de armadura seja mantida constante no valor nominal.



Com a circulação da corrente I_{AP} e a presença do fluxo Φ , geralmente o fluxo nominal (Φ_N) resulta na armadura o conjugado de partida (M_P), dado pela expressão:

$$M_P = K \cdot \Phi_N \cdot I_{AP} \quad (17)$$

Ao ser energizado (havendo fluxo e corrente de armadura) o motor produz um conjugado denominado *Conjugado de Partida* (M_P). Se este conjugado é maior que o conjugado de carga (M_C), o conjunto motor-carga acelera. Com o movimento da armadura, é desenvolvida em seus circuitos a FEM (E), que se contrapõe à tensão aplicada.

$$E = C_2 \cdot \Phi_N \cdot n \quad (18)$$

Deste modo, a corrente de armadura será definida pela expressão (19):

$$I_A = \frac{U_A - E}{R_A} \quad (19)$$

EXEMPLO 3:

Um motor de corrente contínua com excitação independente apresenta os seguintes dados nominais:

$$\begin{aligned}P_N &= 325 \text{ [kW]} & R_A &= 0,019 \text{ [ohm]} \\U_{AN} &= 500 \text{ [V]} & \eta_N &= 93\% \\n_N &= 1880 \text{ [rpm]} & J &= 29,2 \text{ [kg.m}^2\text{]}\end{aligned}$$

Este motor aciona uma carga constante e igual a 1400 [N.m]. O momento de inércia da carga (considerando o acoplamento e referido ao eixo do motor) é de $J = 35 \text{ [kg.m}^2\text{]}$. Quanto à operação com sobre-carga o motor apresenta os seguintes dados:

- operação com 1,7 vezes a corrente nominal durante, no máximo, 15 [s].
- operação com 2,0 vezes a corrente nominal durante, no máximo, 10 [s].
- operação com 3,0 vezes a corrente nominal durante, no máximo, 5 [s].

Nestas condições determine:

- O conjugado nominal desenvolvido pelo motor.
- O tempo de partida do acionamento, sabendo-se que deve ser desenvolvido um conjugado acelerador igual a 90 [%] do conjugado nominal do motor.
- O conjugado e a corrente de armadura durante a partida.

SOLUÇÃO:

- O conjugado nominal deve ser determinado pela equação:

$$M_N = \frac{60 \cdot P_N}{2 \cdot \pi \cdot n_N}$$

$$M_N = \frac{60 \cdot 325.000}{2 \cdot \pi \cdot 1880}$$

$$M_N = 1.651 \text{ [N.m]}$$

- O tempo de partida deve ser calculado com o uso da seguinte expressão:

$$M_A = \frac{2\pi}{60} \cdot J \cdot \frac{dn}{dt}$$

Como o conjugado acelerante (M_A) é constante, a expressão acima pode ser substituída pela equação seguinte:

$$M_A = \frac{2\pi}{60} \cdot J \cdot \frac{\Delta n}{\Delta t}$$

Desta forma, tem-se:

$$\Delta t = t_p = \frac{2\pi}{60} \cdot J \cdot \frac{\Delta n}{M_A}$$

Para as condições propostas:

$$J = J_M + J_C$$

$$J = 29,2 + 35 \Rightarrow J = 64,2 \text{ [kg.m}^2\text{]}$$

$$M_A = 0,9 \cdot M_N$$

$$M_A = 0,9 \cdot 1651 \Rightarrow M_A = 1486 \text{ [N.m]}$$

Então:

$$t_p = \frac{2\pi}{60} \cdot 64,2 \cdot \frac{1880}{1486}$$

$$t_p = 8,5 \text{ [s]}$$

c) Como a carga é de 1400 [N.m] e o conjugado acelerador é de 1486 [N.m], tem-se:

$$M_P = M_A + M_C$$

$$M_P = 1486 + 1400$$

$$M_P = 2886 \text{ [N.m]}$$

Admitindo-se que a partida ocorre com o fluxo nominal tem-se:

$$M_P = K \cdot \Phi_N \cdot I_{AP}$$

Nas condições nominais, tem-se:

$$M_N = K \cdot \Phi_N \cdot I_{AN}$$

Desta forma, resulta que a corrente de armadura da máquina no instante da partida deve ser calculada através da seguinte expressão:

$$I_{AP} = I_{AN} \cdot \frac{M_P}{M_N}$$

A corrente nominal é definida por:

$$I_{AN} = \frac{325000}{500 \cdot 0,93} \Rightarrow I_{AN} = 699 \text{ [A]}$$

o que vai resultar para corrente de partida.

$$I_{AP} = 699 \cdot \frac{2886}{1651}$$

$$I_{AP} = 1222 \text{ [A]}$$

Este resultado ($I_{AP} = 1,75 \cdot I_{AN}$) indica a viabilidade do acionamento conforme proposto pelo exemplo, pois pelos dados do motor fornecidos pelo fabricante, o mesmo admite uma corrente 2,0 vezes a nominal durante 10 [s] e a partida deu-se em 8,5 [s].