

3

Modelagem de motores de passo

Neste capítulo é estudado um modelo de motor de passo híbrido. O modelo desenvolvido é implementado no ambiente computacional Simulink/MATLAB. Este modelo pode ser utilizado em motores de ímã permanente, apesar de ser estruturalmente diferente do híbrido [15]. Uma análise de como o motor de passo é capaz de gerar torque é apresentada. A teoria do comportamento dinâmico apresentado é baseada no modelo proposto por Lawrenson e Hughes [19]. O modelo é baseado em um modelo elétrico e um mecânico. Estes dois modelos estão conectados pelo torque que aparece em ambos. No elétrico, aparece o torque gerado pela força eletromagnética. No mecânico, o torque aparece na equação de movimento de um rotor com inércia apoiado em mancais com atrito.

Uma modelagem mais precisa dos motores de passo exige um modelo em elementos finitos tridimensional do seu interior [20]. Estes modelos são utilizados por fabricantes para otimizar o desempenho dos motores de passo. A modelagem apresentada a seguir é mais simples, baseada em um circuito equivalente linear. Este modelo é suficiente para avaliação de algoritmos de controle [21]. A seguir é apresentado o circuito equivalente deste modelo.

3.1.

Circuito equivalente

O circuito equivalente apresentado se baseia em um circuito RL (Resistor-Indutor) com uma fonte de tensão adicional. Este circuito não considera a indutância mútua entre as fases do motor e a saturação do circuito. A Figura 15 mostra o circuito equivalente da fase A.

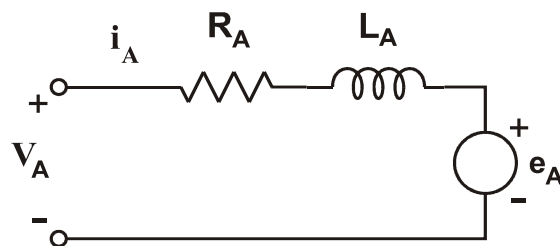


Figura 15 – Circuito equivalente

Nesta figura, R_A é a resistência equivalente da fase A, L_A a indutância, v_A a tensão nos terminais e e_A a tensão induzida. Esta tensão induzida é gerada devido à variação do fluxo magnético com o movimento do ímã permanente. O fluxo induzido varia de acordo com o cosseno do ângulo do rotor. Sendo um motor de duas fases, o fluxo induzido, em cada uma das fases, pode ser representado por

$$\Psi_A = \Psi_M \cos(p\theta) \quad (3.1)$$

$$\Psi_B = \Psi_M \cos(p\theta - \pi/2) \quad (3.2)$$

onde p é o número de dentes do rotor, θ o ângulo de rotação e Ψ_M é o fluxo induzido máximo. Neste caso é considerado que quando $\theta = 0$ o pólo norte do rotor está alinhado com a fase A. A tensão induzida e_A é igual à taxa de variação do fluxo induzido. No caso de um rotor girando com velocidade $\frac{d\theta}{dt}$, as tensões induzida nas fases A e B são dadas por

$$e_A = \frac{d\Psi_A}{dt} = -p\Psi_M \sin(p\theta) \frac{d\theta}{dt} \quad (3.3)$$

$$e_B = \frac{d\Psi_B}{dt} = -p\Psi_M \sin(p\theta - \pi/2) \frac{d\theta}{dt} \quad (3.4)$$

A equação da tensão no terminal do circuito equivalente da fase A é

$$v_A = R_A i_A + L_A \frac{di_A}{dt} + e_A \quad (3.5)$$

Substituindo a eq. (3.3) na eq. (3.5), a equação da tensão nos terminais da fase A é obtida:

$$v_A = R_A i_A + L_A \frac{di_A}{dt} - p\Psi_M \sin(p\theta) \frac{d\theta}{dt} \quad (3.6)$$

Analogamente, a equação da tensão da fase B é

$$v_B = R_B i_B + L_B \frac{di_B}{dt} - p\Psi_M \sin(p\theta - \pi/2) \frac{d\theta}{dt} \quad (3.7)$$

A seguir é apresentado um modelo para o torque gerado.

3.2. Torque gerado

O torque gerado em um motor de passo é resultado de dois efeitos: variação da relutância ao longo da rotação do rotor e o torque eletromagnético gerado pelo ímã permanente. Entretanto, em motores híbridos, o torque eletromagnético é

Neste modelo, o ângulo entre as fases está sendo considerado $\lambda = \pi/2$. Como os circuitos magnéticos são considerados lineares, e a indução entre as duas fases é desprezível, é assumido que o torque total é a soma dos torques gerados por cada uma das fases [15]. A partir disto, o torque gerado pela corrente i_A no enrolamento A é dado por

Devido à fase B estar defasada da fase A, o torque gerado pode ser descrito por

Além destes torques gerados, existe o torque devido à interação dos dentes do estator com os pólos magnéticos do rotor. Este torque é chamado de torque de retenção T_{dm} , ou *detent torque*. Este efeito faz os motores de passo apresentarem torque magnético de retenção mesmo quando desligados. Tipicamente, o torque de retenção está entre 1% e 10% do torque máximo.

Somando os efeitos dos torques gerados na fase A, na fase B e o torque de retenção, temos para o torque eletromagnético gerado:

A seguir é apresentado o efeito do torque no movimento do motor.

3.3. Equação de movimento do motor

O torque gerado pelo motor pode ser acoplado a uma carga na extremidade. Este torque gerado também é utilizado para acelerar o rotor e a carga. Além disso,

o atrito dos mancais do motor e da carga dissipa parte da potência gerada pelo motor. Logo, a equação de movimento deste sistema é dada por

$$\tau_e = J \frac{d^2\theta}{dt^2} + D \frac{d\theta}{dt} + T_L \quad (3.11)$$

onde:

D - Coeficiente de atrito viscoso total (motor+carga).

J - Inércia total (motor+carga).

T_L - Torque externo aplicado.

As equações dos terminais das fases, (3.6) e (3.7), junto com as equações do torque, (3.10) e (3.11), são utilizadas para modelar o motor de passo. Devido à sua complexidade, a simulação do modelo é feita usando o *software* Simulink/MATLAB para a solução numérica. O modelo utilizado considera o circuito equivalente RL (Resistor-Indutor) linear, ou seja, sem saturação. Algumas perdas de fluxo magnético também são desconsideradas.

3.4.

Relação entre dentes, fases e número de passos

Os dentes no interior dos motores de passo são necessários para gerar torque e posicionar o rotor. A Figura 17 mostra como os dentes de um motor de passo são arranjados no rotor e no estator.

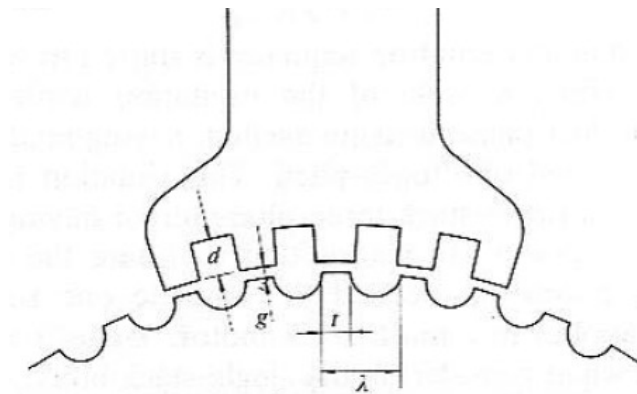


Figura 17 – Dentes rotor e estator [15]

O número de passos por revolução, quando os dentes no estator e no rotor têm o mesmo passo de fabricação, é dado por

$$S = mN_r \quad (3.12)$$

onde:

m – Número de fases

N_r – Número de dentes do rotor; em um motor híbrido, $N_r = p$.

Assim, o ângulo de passo, i.e. incremento na rotação feito por cada passo completo, é dado por

$$\theta_s = \frac{360^\circ}{S} \quad (3.13)$$

3.5.

Cálculo do fluxo induzido máximo

O modelo do motor de passo exige o fluxo eletromagnético máximo induzido. Entretanto, este parâmetro dificilmente é fornecido pelos fabricantes de motores de passo. Este parâmetro pode ser calculado girando o motor com velocidade constante e medindo a tensão nos terminais de uma das fases. Como nesta situação o circuito está aberto, não há corrente na fase, logo a eq. (3.6) pode ser reescrita por

$$v_A = -p\Psi_M \sin(p\theta) \frac{d\theta}{dt} \quad (3.14)$$

A partir desta equação, a tensão máxima medida nos terminais da fase A vale

$$E_M = p\Psi_M \dot{\theta} \quad (3.15)$$

Provavelmente seria utilizado um tacômetro com escala em rotações por minuto (RPM) para medir a velocidade angular. Logo, é interessante colocar a expressão de Ψ_M em função de N , com unidade de RPM. A expressão utilizada para o cálculo de Ψ_M em função dos valores medidos resulta então em

$$\Psi_M = \frac{30E_M}{p\pi N} \quad (3.16)$$

No próximo capítulo, o controle dos motores de passo é discutido.