

MODELO MATEMÁTICO DE MOTORES DE PASSO E MOTORES DE CORRENTE CONTÍNUA DO TIPO CORELESS E BRUSHLESS

ANTONELA BITTENCOURT MAAG¹; OTAVIO SOARES FOLHARINI ²;
MARCELO ESPOSITO³; SIGMAR DE LIMA⁴

¹ Universidade Federal de Pelotas – atmaag@gmail.com

² Universidade Federal de Pelotas – otaviosfolharini@gmail.com

³ Universidade Federal de Pelotas – engesposito@gmail.com

⁴ Universidade Federal de Pelotas – sigmar.lima@ufpel.edu.br

1. INTRODUÇÃO

Nos últimos anos, os motores de corrente contínua sem escovas (BLDC) veem ganhando certa popularidade. Um motor de corrente contínua (CC) sem escovas (BLDC) é uma máquina síncrona girante com ímãs permanentes no rotor e com a posição do rotor conhecida, para possibilitar a comutação eletrônica. Uma das vantagens do motor CC *Brushless* sobre os motores de corrente contínua convencionais é a ausência de um comutador eletromecânico e de escovas. (KRISHNAN, SAMSKRITI & VITTAL, 2015).

Motor BLDC com alimentação em duas ou três fases possui certas vantagens sobre os motores convencionais, dentre elas: melhor característica de velocidade por torque; alta eficiência e confiabilidade; vida útil longa; atuação silenciosa; alcance de altas velocidades; e baixa interferência eletromagnética. Todas essas características se destacam quando o motor *Brushless* é comparado com motores de indução e motores CC. Para gerar torques constantes, esses motores requerem uma onda quadrada como corrente do estator. (RAMBABU, 2007).

Outra categoria muito utilizada são os motores de passo. Esses estão consolidados no mercado há mais tempo, sendo utilizados em servomecanismos desde 1930. Os *Stepper Motors* são uma das soluções mais utilizadas em situações em que é necessária alta precisão de posicionamento e o sistema em malha aberta é preferido para se ter maior robustez ou para reduzir custos pela eliminação de sensores. Essas aplicações vão desde impressoras, passando por drives de disco compactos até colimadores em aceleradores de partículas. (BUTCHER et al., 2014).

Esse tipo de motor é formado de duas estruturas: o rotor e o estator. O rotor é o conjunto eixo-ímã que gira dentro do campo magnético gerado no motor. E o estator é a parte fixa onde as bobinas são enroladas (CONSTANDINOU, 2003). Como o próprio nome sugere, a rotação de seu eixo é gerada na forma de passo a cada pulso que lhe é fornecido, sendo que ele permanece na mesma posição se nenhum outro pulso for enviado. (VIVALDINI, 2009).

Visto a importância desses três tipos de motores elétricos o presente trabalho tem por objetivo realizar um estudo comparativo para motores de passo e motores de corrente contínua do tipo *Coreless* e do tipo *Brushless*. Além disso, estudar os princípios de funcionamento de cada um desses motores, bem como definir uma modelagem matemática para os motores de passo do tipo híbrido e para o motor de corrente contínua do tipo *Brushless*.

2. METODOLOGIA

Em relação aos três tipos de motores de passo existentes, optou-se apenas pela modelagem dos motores de passo do tipo híbrido. Os motores de passo do tipo híbrido possuem as vantagens dos motores de relutância variável e de ímã permanente de forma combinada. O rotor de ímã permanente e o estator possuem polos magnéticos que garantem que o rotor possa ter a movimentação de múltiplos passos, sendo comumente encontrado em rotações de 1.8° por passo. Como combina as melhores características dos dois outros tipos de motores de passo, o tipo híbrido possui um grande torque estático e dinâmico, além de funcionar por pequenos passos, garantindo maior precisão nas tarefas. (CONSTANDINOU, 2003).

Depois de definido o tipo de motor de passo a ser analisado em parâmetros matemáticos, tomou-se o modelo apresentado por CARDOZO (2012). Esse modelo representa o motor de passo do tipo híbrido através de um circuito elétrico mostrado na Figura 1. Além disso usou-se também a modelagem mecânica desse tipo de motor seguindo os estudos do mesmo autor.

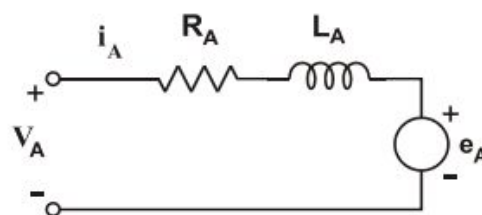


Figura 1 - Modelo elétrico do motor de passo híbrido.
Fonte: Adaptado de CARDOZO, 2012.

Para o motor de corrente contínua *Brushless* (BLDC) seguiu-se um procedimento semelhante ao motor de passo híbrido para definição do modelo matemático, sendo definido um modelo elétrico e outro modelo mecânico. Na Figura 2 é ilustrado o modelo elétrico que baseou a construção da modelagem matemática desse motor, definido por BARATIERI (2011).

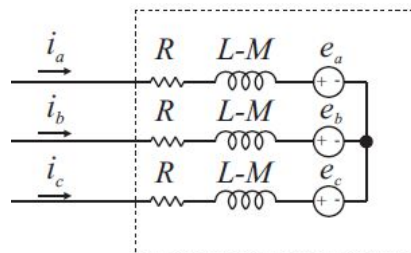


Figura 2 - Modelo elétrico para motor de corrente contínua *brushless*
Fonte: Adaptado de BARATIERI, 2011.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Quanto a modelagem matemática do motor de passo do tipo híbrido usou-se princípios como o da Conservação de Energia para definir que a potência mecânica da saída da máquina deve ser igual a potência mecânica da entrada da mesma, além da Lei de Newton-Euler para definir o somatório dos binários do sistema. Dessa forma, encontrou-se as equações matemáticas que modelam o sistema tanto no aspecto elétrico quanto no aspecto mecânico. A partir dessa modelagem e considerando o que GAD (2010) apresenta, podemos construir o

espaço de estados desse sistema, de forma a facilitar a modelagem e o entendimento do mesmo.

$$\begin{bmatrix} \dot{i}_a \\ \dot{i}_b \\ \dot{\omega} \\ \dot{\theta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R}{L} & 0 & \frac{K}{L}\sin(\rho\theta) & 0 \\ 0 & -\frac{R}{L} & \frac{K}{L}\cos(\rho\theta) & 0 \\ \frac{K}{L}\sin(\rho\theta) & \frac{K}{L}\cos(\rho\theta) & -\frac{\beta}{J} & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ \omega \\ \theta \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{L} & 0 \\ 0 & \frac{1}{L} \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_a \\ v_b \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ -\frac{T}{L} \\ 0 \end{bmatrix}$$

no qual R = resistência; L = indutância; ρ = número de polos do rotor; θ = ângulo de rotação; β = coeficiente de atrito viscoso; J = momento de inércia; v_a = tensão na fase A; v_b = tensão na fase B; T = torque de carga; i_a = corrente da fase A; i_b = corrente da fase B; ω = velocidade angular do eixo.

O valor da constante K é dado por:

$$K = m \cdot \rho \cdot \psi_M$$

no qual m = número de espiras do enrolamento do estator; ψ_M = fluxo máximo induzido no estator.

Um processo semelhante foi adotado para a modelagem do motor de corrente contínua *Brushless*. Baseado nos trabalhos de BARATIERI (2011) e RAO (2010) projetou-se o espaço de estados para motores BLDC mostrado a seguir.

$$\dot{X} = A [i_a \ i_b \ i_c \ w_r \ \theta_r]^T + B [e_{a(\theta_r)} \ e_{b(\theta_r)} \ e_{c(\theta_r)} \ T]^T$$

$$A = \begin{bmatrix} -\frac{R}{L-M} & 0 & 0 & \frac{-e_{a(\theta_r)}}{(L-M)w_r} & 0 \\ 0 & -\frac{R}{L-M} & 0 & \frac{-e_{b(\theta_r)}}{(L-M)w_r} & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{R}{L-M} & \frac{-e_{c(\theta_r)}}{(L-M)w_r} & 0 \\ \frac{e_{a(\theta_r)}}{w_r} & \frac{e_{b(\theta_r)}}{w_r} & \frac{e_{c(\theta_r)}}{w_r} & \frac{B}{J} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{P}{2} & 0 \end{bmatrix}$$

$$B = \begin{bmatrix} \frac{1}{L-M} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{L-M} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{L-M} & -\frac{1}{J} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

no qual i_a = corrente de fase do enrolamento A; i_b = corrente de fase do enrolamento B; i_c = corrente de fase do enrolamento C; e_a = força contra-eletromotriz da fase a; e_b = força contra-eletromotriz da fase b; e_c = força contra-eletromotriz da fase c; R = resistência de fase do BLDC; M = indutância mútua do BLDC; L = indutância própria de fase do BLDC; θ_r = ângulo mecânico do motor; w_r = velocidade angular de rotação; J = constante de inércia do BLDC; B = coeficiente de atrito viscoso; P = número de pólos do motor.

4. CONCLUSÕES

Neste artigo foi modelado matematicamente o motor de passo de tipo híbrido quanto para o motor de corrente contínua *Brushless*. Para realizar essa modelagem inicialmente fez-se um estudo a respeito dos tipos de motores existentes, de forma a compreender os princípios de funcionamento de cada um deles. Além disso, o equacionamento foi feito na forma de espaço de estados para facilitar uma futura aplicação de controle para esses motores.

5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

KRISHNAN D.; SAMSKRITI T. V.; VITTAL K.P. Review of Developments in BLDC Motor Controllers Along with Study of Four-quadrant Operation and Active Power Factor Correction. **International Conference on Industrial and Information Systems**, Sri Lanka, v.10, p.193-198, 2015.

RAMBABU S. **MODELING AND CONTROL OF A BRUSHLESS DC MOTOR**. 2007. Tese (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Instituto Nacional de Tecnologia, Universidade Deemed.

BUTCHER M.; MASI A., PICATOSTE R., GIUSTINIANI A.. Hybrid Stepper Motor Electrical Model Extensions for Use in Intelligent Drives. **Institute of Electrical and Electronic Engineers (IEEE)**, v.61, n. 2, p.917-928, 2014.

VIVALDINI. **MOTORES DE PASSO - MATERIAL COMPLEMENTAR**. USP. São Carlos, 2009. Acessado em 25 maio 2018. Online. Disponível em: http://www.mecatronica.eesc.usp.br/wiki/upload/0/0a/Motor_passo.pdf

CONSTANDINOU T. G.. **TUDO SOBRE MOTORES DE PASSO: FUNDAMENTOS**. UFSM. Santa Maria, 2003. Acessado em 27 maio 2018. Online. Disponível em: http://w3.ufsm.br/fuentes/index_arquivos/step.pdf

CARDOZO, W. S. **CONTROLE DE MOTORES DE PASSO APLICADO A UM MANIPULADOR ROBÓTICO**. 2012. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Pontífica Universidade Católica do Rio de Janeiro.

BARATIERI C. L. **CONTROLE DE VELOCIDADE SENSORLESS DE MOTORES BRUSHLESS SUBMETIDOS A VARIAÇÕES PERIÓDICAS DE CARGA**. 2011. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Santa Maria.

GAD H. A New Technique for Controlling Hybrid Stepper Motor Through Modified PID Controller. **International Journal of Electrical & Computer Sciences**, v.10, n. 2, p.28-35, 2010.

RAO, A. P. C. ROBUST INTERNAL MODEL CONTROL STRATEGY BASED PID CONTROLLER FOR BLDCM. **International Journal of Engineering Science and Technology**, v.2, n. 11, p.6801-6810, 2010.