

Modelagem e controle vetorial de um motor BLDC

Modeling and vector control of a BLDC motor

RESUMO

Este artigo apresenta uma técnica para controle vetorial de um motor síncrono de ímãs permanentes do tipo BLDC (do inglês - *Brushless DC*). Para implementar essa técnica primeiramente foi realizado a modelagem matemática do motor, através da transformada de Park, e verificado o seu comportamento a malha aberta através de simulação. Para executar o projeto de um sistema de controle a malha fechada foi utilizado a técnica de controle vetorial de campo orientado, empregando três controladores PI (Proporcional Integral) para controle da velocidade, controle de corrente de eixo em quadratura e corrente de eixo direto. Os resultados para a estrutura de controle proposta foram obtidos através do uso do software *MatLab*, apresentando um controle de velocidade que segue a trajetória de referência e respondendo a distúrbios produzidos por variações de carga.

PALAVRAS-CHAVE: Controle vetorial. Motor BLDC. Modelagem.

ABSTRACT

This paper presents a technique for vector control of a permanent magnet synchronous motor of the BLDC (Brushless DC) type. In order to implement this technique, the mathematical modeling of the motor was performed, using the Park transform, and its open loop behavior was verified through simulation. To execute the design of a closed loop control system, the field oriented vector control technique was used, employing three PI (Proportional Integral) controllers for speed control, quadrature axis current control and direct axis current. The results for the proposed control structure were obtained through the use of the *MatLab* software, presenting a speed control that follows the reference trajectory and responding to disturbances produced by load variations.

KEYWORDS: Vector control. BLDC motor. Modeling.

Lucas Henrique da Silva
lucassilva.1996@alunos.utfpr.edu.br
Universidade Tecnológica Federal
do Paraná, Pato Branco, Paraná,
Brasil.

César Rafael Claire Torrico
cesartorrico@utfpr.edu.br
Universidade Tecnológica Federal
do Paraná, Pato Branco, Paraná,
Brasil.

Recebido: 19 ago. 2020.

Aprovado: 01 out. 2020.

Direito autoral: Este trabalho está licenciado sob os termos da Licença Creative Commons-Atribuição 4.0 Internacional.



INTRODUÇÃO

Para uma escolha apropriada do tipo de motores destinados a veículos elétricos, pesquisas vem apontado aos motores elétricos síncronos com ímãs permanentes, denotados de BLDC (do inglês - *Brushless-DC*), como melhor alternativa de aplicação, devido às suas características de tamanho reduzido e alto desempenho (Damiano *et al.* (2017), Kumar; Sivakumar (2017)). Segundo a empresa de motores WEG (2020), a substituição de um motor de indução por um BLDC permite reduzir a carcaça em até 77 % do volume para uma mesma potência, conseqüentemente uma redução aproximada de peso na mesma proporção, ainda, a eficiência desse tipo de motores pode alcançar até 97,4%. Os motores *Brushless DC* funcionam em todas as velocidades com carga nominal e com uma alta faixa de velocidade sem limitações mecânicas. Por não utilizarem escovas, possuem uma longa vida útil e com pouca manutenção. Vale destacar que, a razão entre o torque fornecido e o tamanho do motor é maior, o tornando mais útil em lugares em que o espaço físico e o peso são um fator crítico (Yedamale, 2003).

Segundo Carey *et al.* (2019), para um controle preciso e com melhor eficiência, uma opção é a técnica de controle vetorial por orientação de campo. Nesse sentido, o objetivo deste trabalho é a modelagem e projeto de um controle vetorial por campo orientado, aplicado a motores síncronos com ímãs permanentes do tipo BLDC, a fim de garantir a aplicação no acionamento de veículos elétricos compactos.

METODOLOGIA

O desenvolvimento deste trabalho foi dividido em duas etapas: a) Modelagem de um motor BLDC; b) Estudo e aplicação de uma estrutura de controle vetorial a Malha Fechada.

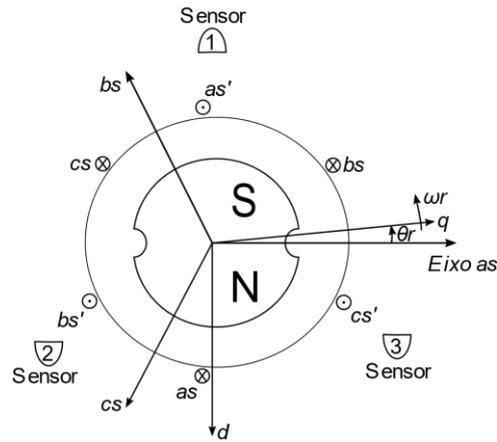
Modelagem de um Motor BLDC

Para descrever a modelagem de um motor BLDC, parte-se do esquema apresentado na Figura 1. Nessa figura, $as - as'$, $bs - bs'$, $cs - cs'$ representam as bobinas do enrolamento do estator, já os eixos as , bs e cs evidenciam o sentido do campo magnético gerado por cada bobina no plano da bobina. O eixo dq equivale à transformada de Park, que neste caso a sua orientação está atrelada à posição do rotor. As variáveis θ_r e ω_r representam a posição angular elétrica e a velocidade angular elétrica do rotor respectivamente.

As equações de tensão e fluxo foram remodeladas sob um novo sistema de referência $qd\phi$, utilizando a transformada de Park. A equação (1) mostra as equações de tensão para esse motor,

$$\begin{aligned}V_{qs} &= r_s i_{qs} + \omega_r \lambda_{ds} + \dot{\lambda}_{qs} \\V_{ds} &= r_s i_{ds} + \omega_r \lambda_{qs} + \dot{\lambda}_{ds} \\V_{0s} &= r_s i_{0s} + \dot{\lambda}_{0s},\end{aligned}\tag{1}$$

Figura 1 - Esquema genérico de um motor *brushless* DC



Fonte: Adaptado de Krause (2013).

onde, r_s representa a resistência da bobina do estator por fase, as variáveis V_{qs} , i_{qs} , λ_{qs} e $\dot{\lambda}_{qs}$ representam respectivamente a tensão, corrente, fluxo e a derivada do fluxo, todas no estator, em relação ao eixo de quadratura q . Já as variáveis V_{ds} , i_{ds} , λ_{ds} e $\dot{\lambda}_{ds}$ representam respectivamente a tensão, corrente, fluxo e a derivada do fluxo, todas no estator, em relação ao eixo direto d . V_{0s} , i_{0s} , $\dot{\lambda}_{0s}$ são variáveis do estator da componente homopolar, surgindo quando o sistema não está equilibrado. Na equação (2) apresentam-se as equações de fluxo para o motor *Brushless* DC,

$$\begin{aligned} \lambda_{qs} &= L_q i_{qs} \\ \lambda_{ds} &= L_d i_{ds} + \lambda_m' \\ \lambda_{0s} &= L_{ls} i_{0s}, \end{aligned} \quad (2)$$

em que λ_m' corresponde à amplitude do fluxo estabelecido pelo imã permanente, L_q e L_d representam as indutâncias no eixo direto e em quadratura respectivamente, onde $L_q = L_{ls} + L_{mq}$ e $L_d = L_{ls} + L_{md}$, sendo L_{ls} a indutância de dispersão própria do estator, L_{mq} e L_{md} as indutâncias de magnetização do eixo em quadratura e eixo direto respectivamente. Por outro lado, a equação de torque eletromagnético (T_e) do motor BLDC, segundo Krause (2013), é definido como mostra a equação (3).

$$T_e = \left(\frac{3}{2}\right) \left(\frac{P}{2}\right) (\lambda_{ds} i_{qs} - \lambda_{qs} i_{ds}), \quad (3)$$

em que P são os números de polos do motor. Sabe-se que o torque eletromagnético é transferido para o sistema mecânico. Com base nisso, pode-se aplicar a segunda lei de Newton, obtendo-se a equação (4).

$$T_e = J \left(\frac{2}{P}\right) \dot{\omega}_r + D \left(\frac{2}{P}\right) \omega_r + T_L, \quad (4)$$

em que, J representa o momento de inércia do rotor, a constante D é um coeficiente de amortecimento associado ao sistema rotacional da máquina e a carga mecânica, já T_L refere-se ao torque de uma carga.

A partir das equações descritas anteriormente, e considerando o sistema equilibrado, isto é, componentes homopolares nulas, pode ser obtido o modelo elétrico no espaço de estados conforme apresenta-se na equação (5).

$$\begin{bmatrix} \dot{i}_{qs} \\ \dot{i}_{ds} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -r_s/L_q & -\omega_r/L_q \\ \omega_r/L_d & -r_s/L_d \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{qs} \\ i_{ds} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1/L_q & 0 & -\omega_r/L_q \\ 0 & 1/L_d & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{qs} \\ v_{ds} \\ \lambda_m' \end{bmatrix} \quad (5)$$

Da mesma forma, conforme a equação (6), tem-se modelo mecânico no espaço de estados.

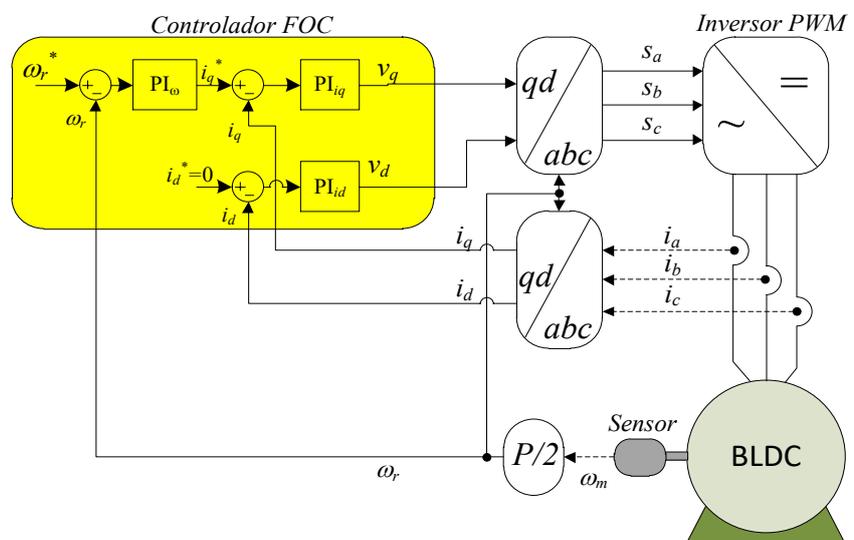
$$\begin{bmatrix} \dot{\omega}_r \\ \dot{\theta}_r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -D/J & 0 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \omega_r \\ \theta_r \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} P/2J & -P/2J \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_e \\ T_L \end{bmatrix} \quad (6)$$

Esses dois modelos apresentados nas equações (5) e (6) foram utilizados na subseção seguinte para implementar a simulação do comportamento dinâmico do motor.

Estrutura de controle vetorial a Malha Fechada

Motores de corrente alternada são controlados utilizando inversores de corrente e como estratégia de controle usando habitualmente técnicas de controle vetorial de campo orientado (*Field Oriented Control - FOC*). Na Figura 2 apresenta-se uma estrutura padrão que normalmente é utilizado para acionamento de motores de corrente alternada (Krause (2013), Quang; Dittrich (2015), Sul (2010)).

Figura 2 - Estrutura de acionamento de motores trifásicos de corrente alternada



Fonte: Adaptado de (Krause (2013), Quang; Dittrich (2015), Sul (2010)).

Na Figura 2, ω_m representa a velocidade mecânica do rotor, ω_r^* representa a velocidade de referência, as variáveis i_q^* e i_d^* , representam as correntes de

referência nos eixos em quadratura e direto respectivamente. A decomposição do controle em eixo de quadratura e direto permite que o controle de um motor de corrente alternada seja realizado como se estivesse sendo controlado um motor convencional de corrente contínua, dessa forma facilitando a implementação e projeto dos controladores.

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Nesta seção serão apresentados os resultados de simulação dos tópicos descritos na Metodologia:

Resultados de Simulação do Motor a Malha Fechada.

Para resolução das equações de estado do motor foi utilizado o método de Euler. Os dados do motor para simulação, estão descritos na Tabela 1:

Tabela 1 - Dados do Motor para Simulação

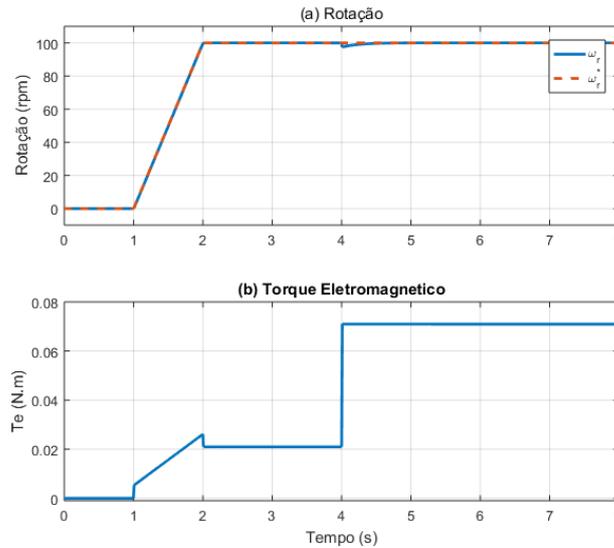
Parâmetro	Valor
Tensão de fase (V_s)	11,5 V (rms)
Número de polos (P)	4
Momento de inércia do rotor (J)	$5,0 \times 10^{-4}$ kg.m ²
Constante de atrito viscoso (D)	$1,5 \times 10^{-3}$ N.s/m
Resistência do estator (r_s)	3,4 Ω
Indutância de dispersão do estator (L_{ls})	$1,1 \times 10^{-3}$ H
Indutância de magnetização no eixo de quadratura (L_{mq})	$11,0 \times 10^{-3}$ H
Indutância de magnetização no eixo direto (L_{md})	$11,0 \times 10^{-3}$ H

Extraído de Krause, 2013.

Os resultados desta seção seguem a estrutura de acionamento apresentado na Figura 2 os quais foram implementados no software MatLab® para simulação. Conforme forma de onda apresentada na Figura 3(a), propõe-se uma referência de velocidade em rampa com o motivo de diminuir o valor da corrente de pico da partida. Uma vez o motor em regime, é aplicado ao motor um torque de carga de 0,05 Nm em $t=4$ s. A resposta de rotação e torque eletromagnético do motor apresenta-se na Figura 3.

Observa-se na Figura 3(a) que a velocidade de rotação do motor segue fielmente a referência de velocidade, mesmo que em $t=4$ s seja aplicado um torque de carga o qual provoca um pequeno desvio de velocidade que é corrigido em aproximadamente 0,5s. Na Figura 3(b) observa-se o comportamento do torque eletromagnético. No intervalo de 1 a 2s o torque sobe em forma de rampa para vencer a inércia do rotor e acompanhar a referência de velocidade, já no intervalo de 2 a 4s, o torque eletromagnético se mantém constante, cujo valor é o necessário para equilibrar as perdas por atrito, finalmente após os 4s, o torque eletromagnético sobe para suprir a carga aplicada ao motor junto com as perdas por atrito.

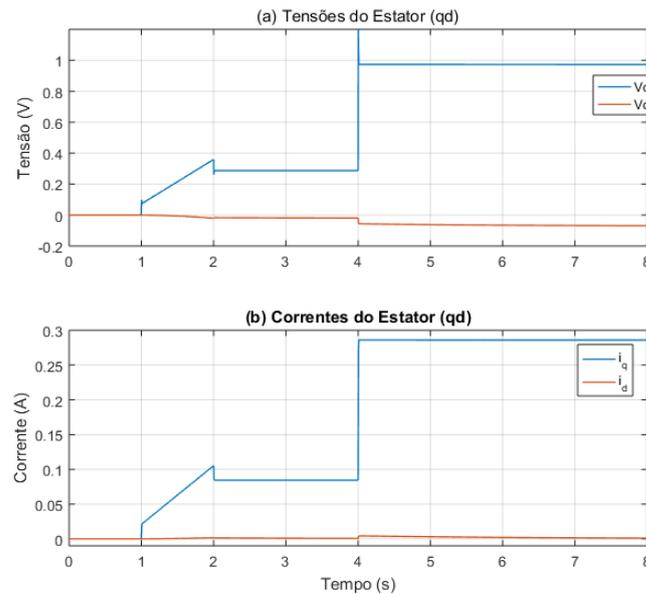
Figura 3 – Resposta sistema para: (a) Velocidade de rotação; (b) Torque Eletromagnético.



Fonte: Autoria própria (2020).

Na Figura 4 apresentam-se as tensões e correntes do motor no sistema de referência qd . Observa-se nessa figura que a tensão e corrente em quadratura, tem o mesmo formato do torque eletromagnético, semelhante ao que aconteceria no controle de um motor de corrente contínua.

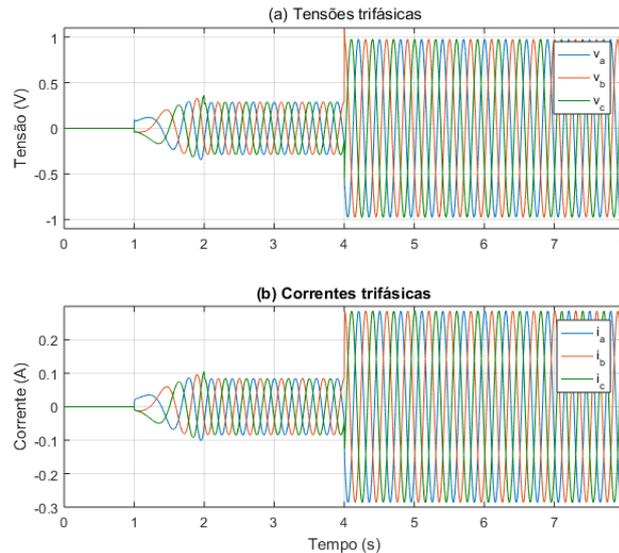
Figura 4 - (a) Tensões do estator no sistema qd; (b) Correntes do estator no sistema qd.



Fonte: Autoria própria (2020).

Uma vez que o motor BLDC é um motor de corrente alternada, precisa ser alimentado por uma fonte de tensão alternada, o qual pode ser sintetizado a partir de um inversor modulado por PWM. Na Figura 5 apresenta-se o comportamento das tensões e correntes alternadas do motor.

Figura 5 - (a) Tensões do estator no sistema *abc*; (b) Correntes do estator no sistema *abc*.



Fonte: Autoria própria (2020).

Na Figura 5(a) apresenta-se a tensão que precisaria ser sintetizada para alimentar o motor através de um inversor de frequência. Já a Figura 5(b) representa a corrente nos enrolamentos das fases do motor.

CONCLUSÃO

Foi apresentado nesse artigo uma técnica para controle vetorial de um motor síncrono com ímãs permanentes do tipo BLDC. Utilizou-se para realização desse procedimento a modelagem matemática do motor, através da transformada de Park, e a simulação da implementação do projeto de um sistema de controle vetorial de velocidade por campo orientado, através do *MatLab*[®].

A modelagem matemática do motor foi realizada com êxito, uma vez que com a transformada de Park têm-se a relação entre os enrolamentos reais do estator da máquina e três enrolamentos pseudo estacionários (*d, q, 0*), fazendo com que as variáveis se comportem como se fossem de corrente contínua e possa ser aplicada as técnicas convencionais de controle.

Em relação ao objetivo principal do trabalho, pode-se concluir que a estrutura de controle funciona para o modelo proposto, pois é possível ver através dos resultados que mesmo com a perturbação de um degrau de toque de carga, a velocidade segue a referência desejada, tendo apenas um leve desvio pouco relevante.

Como sugestões para trabalhos futuros destacam-se: (a) considerar os efeitos do sinal PWM, pois numa implementação prática é possível que os resultados sejam ligeiramente distintos, devido ao efeito da comutação das chaves; (b) propor um controlador de torque ao invés de controlador de velocidade, pois num veículo elétrico o acelerador gera uma referência de torque.

REFERÊNCIAS

CAREY, K. D.; ZIMMERMAN, N.; ABABEI, C. Hybrid field oriented and direct torque control for sensorless BLDC motors used in aerial drones. **IET Power Electronics**, v. 12, n. 3, p. 438–449, 2019. Disponível em: <https://digital-library.theiet.org/content/journals/10.1049/iet-pel.2018.5231>. Acesso em: 06 dez. 2019.

DAMIANO, A.; FLORIS, A.; FOIS, G.; et al. Design of a High-Speed Ferrite-Based Brushless DC Machine for Electric Vehicles. **IEEE Transactions on Industry Applications**, v. 53, n. 5, p. 4279–4287, 2017. Disponível em: <http://ieeexplore.ieee.org/document/7913620/>. Acesso em: 03 fev. 2020.

KRAUSE, P. W. O. S. S. D. ; P. S. **Analysis of Electric Machinery and Drive Systems**. 3º ed. Wiley-IEEE Press, 2013.

KUMAR, B. V. R.; SIVAKUMAR, K. Design of a new switched-stator BLDC drive to improve the energy efficiency of an electric vehicle. 2017 IEEE International Conference on Industrial Technology (ICIT). **Anais...** . p.532–537, 2017. IEEE. Disponível em: <http://ieeexplore.ieee.org/document/7915414/> . Acesso em: 13 fev. 2020.

QUANG, N. P.; DITTRICH, J.-A. **Vector Control of Three-Phase AC Machines**. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2015.

SUL, S.-K. **Control of Electric Machine Drive Systems**. Hoboken, NJ, USA: John Wiley & Sons, Inc., 2010.

WEG. W22 Magnet Drive System. **Grupo WEG - Unidade Motores**, p. 16, 2020. Disponível em: www.weg.net. Acesso em: 11 mar. 2020.

YEDAMALE, P. Myasthénie guérie par l’ablation d’un thymus non tumoral; **Microchip Application Notes**, p. 1–20, 2003. Disponível em: <http://ww1.microchip.com/downloads/en/appnotes/00885a.pdf>. Acesso em: 11 mar. 2020.