

ESTRATÉGIA DE CONTROLE DE VELOCIDADE APLICADO AO MOTOR *BRUSHLESS DC*

Jackson Samuar Gabe

Acadêmico do curso de Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Pampa
jsamuar@gmail.com

Júnior Santis Vieira

Graduado em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal do Pampa
juniorvieiro@gmail.com

Rodrigo Padilha Vieira

Professor do curso de Engenharia Elétrica Universidade Federal do Pampa
rodrigovieira@unipampa.edu.br

Resumo. *Este artigo apresenta um método de controle vetorial aplicado à máquina Brushless DC. Faz-se a modelagem matemática da máquina com o objetivo de se obter a função de transferência e projetar os ganhos dos controladores da malha de controle da corrente e da malha de controle da velocidade rotórica. Este estudo apresenta as transformações de referenciais, dando ênfase para a Transformada de Park Estendida, a qual é adequada para máquinas não-senoidais. Resultados de simulação são expostos para validação da estratégia de controle apresentada.*

Palavras-chave: *Controle vetorial. Máquina Brushless DC. Transformação de Park Estendida.*

1. INTRODUÇÃO

Os motores de ímãs permanentes são caracterizados pela alta densidade de potência, sendo adequados em aplicações onde se exija variação de velocidade, tornando-se atrativo para a indústria (YEO, et al, 1997).

O desenvolvimento do controle vetorial para motores de indução, bem como máquinas síncronas, baseia-se nas técnicas de transformação de referencial. Tais técnicas permitem o controle de máquinas de

corrente alternada de maneira análoga ao controle realizado de máquinas de corrente contínua (MILLER, 1989).

Este estudo apresenta um sistema de controle vetorial de velocidade aplicado à máquina *Brushless DC*, sendo utilizada a Transformada de Park Estendida, devido à característica de força contraeletromotriz não senoidal.

2. MODELAGEM DA MÁQUINA

Os motores *Brushless DC* são alimentados por um conjunto de correntes trifásicas com uma forma de onda quase quadrada através de inversores de ponte completa sendo que através deste circuito é que se obtêm a modelagem matemática deste motor (BARATIERI, 2011).

A função de transferência da máquina *Brushless DC* é determinada pela modelagem da máquina no referencial síncrono (KRISHNAN, 2001).

As equações que modelam o comportamento dinâmico da máquina *Brushless DC*, são apresentados por fases através das Eq. (1)-(3) sendo estas respectivamente para as fases *a*, *b* e *c*.

$$v_a = (L_s - M) \frac{di_a}{dt} + R_a i_a + p\omega \phi'_{ra} \quad (1)$$

$$v_b = (L_s - M) \frac{di_b}{dt} + R_b i_b + p\omega \phi'_{rb} \quad (2)$$

$$v_c = (L_s - M) \frac{di_c}{dt} + R_c i_c + p\omega \phi'_{rc} \quad (3)$$

Sendo v_n a tensão da fase (V), L_s a indutância própria da fase (H), M a indutância mútua (H), i_n a corrente de fase (A), R_n a resistência do estator da fase (Ω), p o número de pares de pólos da máquina, ω a velocidade angular (rad/s) e ϕ'_m o fluxo induzido na fase do estator em função da posição rotórica (Wb), onde “ n ” representa a fase.

Para se obter a função de transferência da máquina *Brushless DC* são aplicadas transformadas de referencial, para análise da máquina (KRAUSE et al., 2002). Desta forma, aplicam-se as Eq.(1)-(3), a Transformada $\alpha\beta\theta$, a qual transforma um sistema trifásico em um sistema bifásico equivalente e a Transformada de Park, a qual transforma o sistema bifásico ($\alpha\beta$) em um sistema de referencial de eixo direto e de quadratura ($d-q$) (GRENIER & LOUIS, 1995).

Aplicada a transformada de Laplace, se obtém a função de transferência da máquina *Brushless DC* (G_p) no referencial síncrono, Eq. (4). Sendo usada tanto para o referencial de eixo direto como de eixo de quadratura.

$$G_p(s) = \frac{1}{s(L - M) + R} \quad (4)$$

2.2 Transformação de Park Estendida

O controle vetorial, utilizando o modelo baseado na Transformada de Park, pode ser aplicado a máquinas de ímãs permanentes que possuem força contraeletromotriz senoidal. Porém, para máquinas que possuem força contraeletromotriz não senoidal esta transformação não é bem definida. Assim, propõem-se a aplicação da Transformada de Park Estendida, a qual se

obtem o modelo dinâmico dos motores de ímã, permanente independentemente de sua forma contra eletromotriz (GRENIER & LOUIS, 1995).

Nas máquinas com força contraeletromotriz senoidal pode-se considerar que a componente de sequência zero não produz torque, porém, contribui para as perdas do cobre do motor. Desta forma, a máquina é reduzida a um sistema de coordenadas “ $\alpha-\beta$ ”. Para máquinas de força contraeletromotriz não senoidal, a componente de sequência zero pode não ser nula (GRENIER & LOUIS, 1995).

Aplicada a Transformada de Park Estendida nas equações (1)-(3), obtém-se, o comportamento dinâmico da máquina no sistema $\alpha\beta\theta$ através das Eq. (4)-(6), sendo respectivamente para as fases α , β e θ .

$$v_\alpha = R_s i_\alpha + (L_s - M) \cdot \frac{di_\alpha}{dt} + p\omega \phi'_{r\alpha} \quad (4)$$

$$v_\beta = R_s i_\beta + (L_s - M) \cdot \frac{di_\beta}{dt} + p\omega \phi'_{r\beta} \quad (5)$$

$$v_0 = R_s i_0 + (L_s + 2M) \cdot \frac{di_0}{dt} + p\omega \phi'_{r0} \quad (6)$$

A transformada de Park Estendida propõe que uma das componentes vetoriais do fluxo rotórico seja nula, pela inclusão do coeficiente de variação angular ($\mu(\theta)$) na Transformada de Park Convencional. Desta forma, sendo o fluxo de eixo direto nulo, $\phi'_{rd} = 0$, a componente do fluxo de quadratura, ϕ'_{rq} , não deve ser nula, sendo obtida através da posição do rotor. Sendo uma máquina de ímãs permanentes, conectada em estrela, com força contraeletromotriz não senoidal, esta apresentará uma variação no ângulo do fluxo rotórico o qual definirá os componentes de eixo direto e eixo de quadratura, através dos pseudo-eixos girantes, descrito por “ $p(\theta) + \mu(\theta)$ ”, onde $p(\theta)$ é a posição do rotor (GRENIER & LOUIS, 1995).

Assim, é definida a transformada de Park Estendida, Eq. (7),

$$\begin{bmatrix} 0 \\ \phi'_{rq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\gamma(\theta)) & \sin(\gamma(\theta)) \\ -\sin(\gamma(\theta)) & \cos(\gamma(\theta)) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \phi'_{r\alpha} \\ \phi'_{r\beta} \end{bmatrix} \quad (7)$$

onde, $\gamma = p(\theta) + \mu(\theta)$. Sendo que o coeficiente de variação angular é expresso pelas Eq. (8) e Eq.(9) (GRENIER & LOUIS, 1995).

$$\sin(\gamma(\theta)) = -\frac{\phi'_{r\alpha}}{\phi'_{rq}} \quad (8)$$

$$\cos(\gamma(\theta)) = \frac{\phi'_{r\beta}}{\phi'_{rq}} \quad (9)$$

Assim, o fluxo rotórico do eixo de quadratura é expresso pela Eq. (10).

$$\phi'_{rq}(\theta) = \sqrt{\phi'_{r\alpha}(\theta)^2 + \phi'_{r\beta}(\theta)^2} \quad (10)$$

O coeficiente de variação angular depende apenas da variação angular do rotor assim, verifica-se que para a força contraeletromotriz senoidal este valor é nulo.

3. RESULTADOS DE SIMUALÇÃO

Para validar a estratégia de controle vetorial de velocidade para a máquina *Brushless DC* são apresentados resultados de simulação, utilizando o software Matlab/Simulink. A máquina utilizada apresenta os seguintes parâmetros: $R = 2,8750\Omega$, $L = 8,5 \cdot 10^{-3} \text{ H}$, coeficiente de atrito viscoso (B) de $4 \cdot 10^{-3} \text{ Nms}$, constante de inércia (J) de $0,8 \cdot 10^{-3} \text{ kgm}^2$, frequência (f) de 60 Hz e 1 par de pólos. Sendo que, aciona uma carga com torque de 2,5 N/m.

A Figura 1 mostra o diagrama do controle vetorial de velocidade para a máquina através das transformadas de referenciais, sendo utilizados controladores do tipo Proporcional Integral (PI) na malha de controle de corrente e na malha de controle de velocidade.

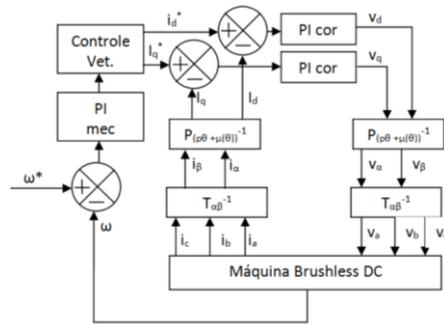


Fig. 1 Diagrama de controle vetorial.

O primeiro resultado de simulação apresenta a resposta de velocidade conforme apresentado na Fig. 2.

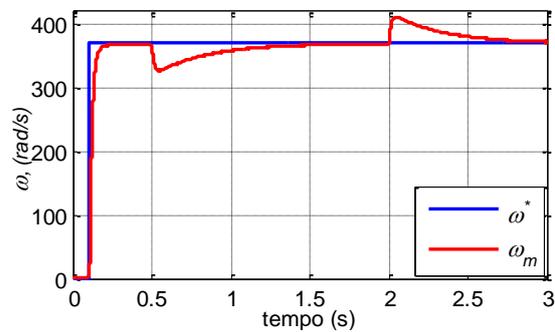


Figura 2. Comparação da velocidade de referência com a velocidade rotórica medida.

Pode se verificar, que a velocidade rotórica medida converge para o valor de referência (ω^*) de 370 rad/s, inclusive com a inserção de carga. Assim, são obtidas as formas de onda das correntes trifásicas no sistema de controle de velocidade aplicado em malha fechada para a máquina *Brushless DC*, Fig.3.

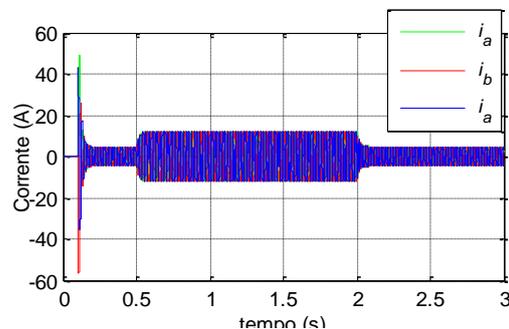


Fig. 3. Correntes Trifásicas.

Utilizando a Transformada $\alpha\beta$ e a Transformada de Park estendida, no sistema de controle de velocidade, são apresentada

as correntes de eixo direto e eixo de quadratura, Fig. 4.

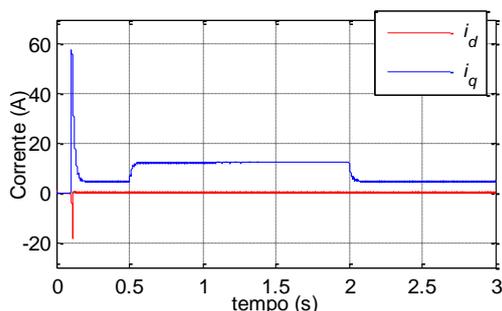


Fig. 4 Correntes de eixo d-q.

Aplicando as transformações inversas da Transformada de Park estendida e a Transformada $\alpha\beta$, reconstitui-se as forma de tensão trifásica, Fig. 5.

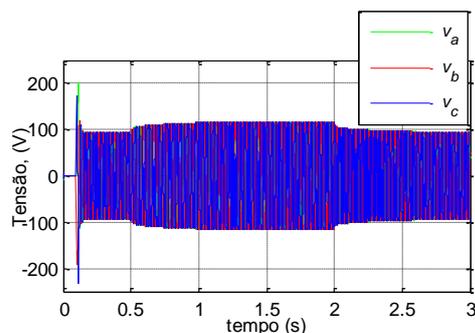


Fig. 5 Tensão trifásica.

Nas Figuras (3) e (5), pode-se visualizar a elevação das correntes e tensões trifásicas, devido à inserção de carga, como característica do motor de retornar a velocidade de sincronismo.

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este estudo apresentou um sistema de controle vetorial de velocidade, utilizando controladores PI na malha de controle de corrente e controle de velocidade. Sendo apresentada, a função de transferência da máquina e as transformações de referencial, dando-se ênfase a Transformada de Park estendida, a qual é a mais adequada para máquina de força contraeletromotriz não senoidal. Por fim, foram apresentados resultados de simulações do sistema, para

validação da estratégia de controle. Sendo os resultados comprovados pelas teorias propostas, tornando-se apto no controle vetorial de velocidade da máquina *Brushless DC*.

5. REFERÊNCIAS

BARATIERI, C. L. **Controle de velocidade sensorless de motores Brushless DC submetidos a variações periódicas de carga**. Dissertação (mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria - RS, 2011. 151 p.

GRENIER, D.; LOUIS, J.P. Use of an extension of the Park's transformation to determine control laws applied to a non-sinusoidal permanent magnet synchronous motor. *Power Electronics and Applications*. Fifth European Conference, V.6, no, p. 32-37, 13-16 Sep 1993

KRAUSE, P.C.; WASYNCHUK, O.; SUDHOFF, S. Theory of Brushless DC Machines. In: **Analysis of Electric Machinery and Drive Systems**. Piscataway, New Jersey – EUA: IEE Press, 2002. 261 – 307 p.

KRISHNAN, R. Permanent-Magnet Synchronous and Brushless DC Motor Drives. In: **Electric Motor Drives: modeling, analysis and control**. Upper Saddle River, New Jersey – EUA: Prentice Hall, 2001. 577 – 581 p.

MILLER, T.J.E. Introduction. In: **Brushless Permanent-Magnet and Reluctance Motor Drives**. Oxford, Reino Unido – U.K: Oxford Science Publications, 1989. 7-8 p.

YEO, H.G. et al. Sensorless drive for interior permanent magnet brushless DC motors. In: **ELECTRIC MACHINES AND DRIVES CONFERENCE RECORD**, 5, 1997, IEEE International. **Anais...** IEEE International. p. 18-21.