

Análise dos Métodos de Reconstrução de Velocidade em Algoritmos *Sensorless* Para a Máquinas Síncronas de Ímãs Permanentes

Cesar José Volpato Filho* Rodrigo Padilha Vieira**

* Grupo de Eletrônica de Potência e Controle, Universidade Federal de Santa Maria, RS, (e-mail: volpatocesarfilho@gmail.com).

** Grupo de Eletrônica de Potência e Controle, Universidade Federal de Santa Maria, RS, (e-mail: rodrigovie@gmail.com).

Abstract: This paper presents an analysis of the main speed reconstruction methods in sensorless control algorithms for permanent magnet synchronous machines (PMSM). Since the PMSM position information is contained in the electromotive force (EMF), a full-order state observer is used in order to observe such variables in the stationary reference frame. A pole placement technique is used for the design of the feedback gain matrix, aiming good performance and stability of the overall system. Through the observed EMF variables, a comparison between the main speed estimation methods is performed. These methods are the derivation of the estimated speed, the utilization of the phase-locked loop (PLL) technique in the observed EMF variables and the gradient descent, making the observer an adaptive full-order observer. Simulation results are presented in order to validate the presented analysis.

Resumo: Este artigo apresenta uma análise dos principais métodos de reconstrução de velocidade em algoritmos de controle *sensorless* para máquinas síncronas de ímã permanentes (*permanent magnet synchronous machines*-PMSM). Como as informações de posição do PMSM estão contidas na força eletromotriz (EMF), um observador de estado de ordem completa é usado para observar essas variáveis no quadro de referência estacionário. É utilizada uma técnica de alocação de polos para o projeto da matriz de realimentação, visando o bom desempenho e a estabilidade de todo o sistema. Através das variáveis EMF observadas, é realizada uma comparação entre os principais métodos de estimativa de velocidade. Esses métodos são a derivação da velocidade estimada, a utilização da técnica PLL (*phase-locked loop*) nas variáveis EMF observadas e o gradiente descendente, tornando o observador um observador adaptativo de ordem completa. Os resultados da simulação são apresentados para validar a análise apresentada.

Keywords: PMSM; sensorless control; state observer; control systems; electrical machines.

Palavras-chaves: PMSM; controle *sensorless*; observador de estados; sistemas de controle; máquinas elétricas.

1. INTRODUÇÃO

Os motores síncronos de ímã permanente (*permanent magnet synchronous motor* - PMSM) estão sendo utilizados para substituir os motores de indução, principalmente em aplicações que exigem alta eficiência e alta densidade de potência (Pillay and Krishnan (1989); Melfi et al. (2009); Mwasilu et al. (2017)). O controle de velocidade rotórica de alta performance requer o conhecimento preciso sobre as variáveis mecânicas, como posição do eixo do rotor e da velocidade do rotor. Isso implica na necessidade de um sensor de posição mecânico, como *encoder* acoplado ao eixo do motor. No entanto, na maioria das aplicações, esse sensor mecânico apresenta desvantagens devido ao custo e tamanho adicionais, confiabilidade reduzida e maior complexidade no sistema de acionamento. Portanto, a operação *sensorless* PMSM é desejada (Boussak (2005); Bolognani et al. (1999); Morimoto et al. (2002); Bolognani et al. (2003)).

A estimativa de velocidade aplicada aos inversores PMSM tem sido amplamente investigada na última década (Baratieri and Pinheiro (2014); Morawiec (2013); Gabbi et al. (2016); Bernardes et al. (2014); Domínguez et al. (2014); Wang et al. (2012); Po-ngam and Sangwongwanich (2012); Park and Sul (2014a); Zaim et al. (2014)). O projeto de estimativa de velocidade é geralmente feito através da estimativa da força eletromotriz (EMF), que contém a informação da posição do rotor do PMSM. Em observadores de estados, a prova de estabilidade e o design dos ganhos são partes vitais do projeto e podem ser tarefas desafiadoras para uma planta não linear como o PMSM. A noção de estabilidade diz respeito à análise e determinação do comportamento de sistemas dinâmicos (Ioannou and Sun (1995)). Uma das ferramentas mais usadas para provar a estabilidade dos sistemas é o método de Lyapunov, essa técnica garante que o sistema decaia exponencialmente ao longo do tempo. O problema desse método é que o decaimento exponencial para o observador deve ser, para aplicações práticas, dez vezes mais rápido que o sistema

real. Isso pode ser difícil de provar pelo método de Lyapunov.

Um controle *sensorless* usando um observador Luenberger é desenvolvido em (Baratieri and Pinheiro (2014)). O ganho do observador é definido pelo componente harmônico mais significativo do back-EMF na velocidade máxima do rotor. Esse processo de design de ganho leva em consideração a operação na velocidade máxima, o que pode ser um ganho muito alto para operações de baixa velocidade. Em (Morawiec (2013)), um observador adaptativo de velocidade de backstepping para PMSM é apresentado. O backstepping é uma técnica recursiva que extrai a lei de controle de uma função Lyapunov pré-projetada para estabilizar o sistema. Este procedimento, embora eficaz para projetar controladores, não garante completamente a estabilidade dos observadores. A função Lyapunov assegura que os autovalores do observador tenham seus componentes reais negativos, esta prova não leva em conta que o observador precisa ter seus autovalores em parte real negativos, mas mais rápidos que os da planta. Isso resulta na necessidade de ajustar vários ganhos para garantir o funcionamento adequado do observador de velocidade, o que não é trivial.

Um observador de modo deslizante em tempo discreto para PMSM é proposto em (Bernardes et al. (2014)). A análise de estabilidade é feita pela função Lyapunov em tempo discreto, onde são derivados os limites da condição do quase deslizamento. Neste estudo, a metodologia para o desenho dos ganhos do observador e a normalização do ganho adaptativo são apresentadas. Em (Park and Sul (2014b)), é desenvolvido um observador de distúrbio adaptativo à frequência, no qual a estimativa do ângulo do rotor é aprimorada pela remoção de distúrbios. A estrutura do observador é feita por funções de transferência, nas quais os ganhos são projetados em função da frequência angular do fluxo do estator. Na teoria de controle, os sistemas auto-ajustados são uma estratégia para otimizar a operação do sistema alterando os parâmetros do sistema. Para aplicar esse conceito a um observador do PMSM, o comportamento da máquina deve ser obtido e os ganhos devem ser ajustados para garantir robustez e desempenho (Bolognani et al. (2014)).

Esse trabalho explora as diferenças entre os métodos de reconstrução de velocidade e posição rotórica do PMSM visando controle *sensorless*. Primeiro, um observador de estados com ordem completa é apresentada e o projeto de alocação de polos é proposto. Através do observador, é realizado uma análise sobre três métodos de estimação de velocidade e posição, são eles o método derivativo, o método de PLL (*Phase-Locked Loop*) e o método adaptativo.

Esse trabalho é organizado da seguinte forma. Na seção II, o modelo dinâmico do IPMSM é apresentado nos referenciais síncrono e estacionário. A seção III propõe o observador de estados de ordem completa para o PMSM e o método de projeto de alocação de polos para ajustar a matriz de realimentação. A análise dos principais métodos de reconstrução das variáveis mecânicas está apresentado na seção IV. Resultados de simulação, mostrados na seção V, validam o método proposto. A seção VI é destinada para as conclusões do trabalho.

2. MODELO MATEMÁTICO DO IPMSM

O modelo dinâmico do PMSM está consolidado na literatura e a representação das correntes do PMSM no referencial síncrono dq é dado por

$$\begin{bmatrix} v_d \\ v_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R + \rho L & -\omega_e L \\ \omega_e L & R + \rho L \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \omega_e \lambda \end{bmatrix}, \quad (1)$$

onde R é a resistência estatórica, L é a indutância estatórica, ρ é o operador diferencial, λ é a constante de fluxo magnético e ω_e é a velocidade do fluxo rotórico. A velocidade rotórica ω_r é obtida dividindo ω_e pelo número de par de polos p e i_d, i_q, v_d, v_q são as correntes e tensões estatóricas no referencial síncrono, respectivamente.

Aplicando a transformada inversa de Park em (1), o modelo matemático do PMSM no referencial estacionário é obtido como

$$\begin{bmatrix} v_\alpha \\ v_\beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R + \rho L & 0 \\ 0 & R + \rho L \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_\alpha \\ e_\beta \end{bmatrix}, \quad (2)$$

onde $i_\alpha, i_\beta, v_\alpha, v_\beta, e_\alpha$ e e_β são as correntes estatóricas, tensões estatóricas e a EMF do referencial estacionário.

As componentes EMF também podem ser representadas da seguinte forma

$$\begin{bmatrix} e_\alpha \\ e_\beta \end{bmatrix} = \omega_e \lambda_m \begin{bmatrix} -\sin \theta_e \\ \cos \theta_e \end{bmatrix}. \quad (3)$$

onde θ_e é a posição do fluxo rotórico do PMSM.

O modelo do espaço de estados das correntes estatóricas é dado por

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} = -\frac{R}{L} \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} + \frac{1}{L} \begin{bmatrix} v_\alpha \\ v_\beta \end{bmatrix} - \frac{1}{L} \begin{bmatrix} e_\alpha \\ e_\beta \end{bmatrix}. \quad (4)$$

Considerando velocidade rotórica constante, o modelo de espaço de estados da EMF é obtido como

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} e_\alpha \\ e_\beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -\omega_e \\ \omega_e & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e_\alpha \\ e_\beta \end{bmatrix}. \quad (5)$$

O modelo de ordem completa do PMSM pode ser representado no espaço de estados no referencial estacionário. Nesse modelo, as entradas são as tensões estatóricas $\mathbf{v} = [v_\alpha \ v_\beta]^T$, as variáveis de estado são as correntes do estator $\mathbf{i} = [i_\alpha \ i_\beta]^T$ e a EMF $\mathbf{e} = [e_\alpha \ e_\beta]^T$. Assim, o modelo linear de ordem completa do PMSM é obtido da seguinte forma

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \mathbf{i} \\ \mathbf{e} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R}{L} & \frac{\mathbf{I}}{L} \\ \mathbf{0} & \mathbf{J}\omega_e \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{i} \\ \mathbf{e} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{\mathbf{I}}{L} \\ \mathbf{0} \end{bmatrix} \mathbf{v}, \quad (6)$$

onde

$$\mathbf{I} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, \mathbf{J} = \begin{bmatrix} 0 & -1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}, \mathbf{0} = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}.$$

O modelo apresentado é extensivamente utilizado na literatura (Krishnan (2009)) e possui as informações de ambas velocidade e posição do rotor do PMSM. Dessa forma, é possível desenvolver algoritmos de estimação de velocidade utilizando os métodos conhecidos de sistemas de controle.

3. OBSERVADOR DE ESTADOS DE ORDEM COMPLETA

Através do modelo de espaço de estados do PMSM (6) obtido na seção anterior, o observador de ordem completa

é definido como

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \hat{\mathbf{i}} \\ \hat{\mathbf{e}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R}{L} & -\frac{\mathbf{I}}{L_d} \\ \mathbf{0} & \mathbf{J}\hat{\omega}_e \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{\mathbf{i}} \\ \hat{\mathbf{e}} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{I} \\ \mathbf{0} \end{bmatrix} \mathbf{v} + \mathbf{H}\tilde{\mathbf{i}}, \quad (7)$$

onde $\mathbf{H} = [h_1\mathbf{I} + h_2\mathbf{J} \ h_3\mathbf{I} + h_4\mathbf{J}]^T$ é a matriz de ganhos de realimentação e os símbolos $\hat{\cdot}$ e $\tilde{\cdot}$ correspondem as variáveis estimadas e o erro entre essas variáveis e as variáveis reais, respectivamente. Nesse observador é considerado que as correntes e as tensões estáticas estão disponíveis para medição

Subtraindo o modelo do PMSM (6) do observador de estados (7), o modelo dinâmico do erro de estimação é obtido como

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \tilde{\mathbf{i}} \\ \tilde{\mathbf{e}} \end{bmatrix} = \underbrace{\begin{bmatrix} h_1\mathbf{I} + h_2\mathbf{J} & -\frac{\mathbf{I}}{L} \\ h_3\mathbf{I} + h_4\mathbf{J} & \mathbf{J}\hat{\omega}_e \end{bmatrix}}_{\mathbf{A}} \begin{bmatrix} \tilde{\mathbf{i}} \\ \tilde{\mathbf{e}} \end{bmatrix} + \underbrace{\begin{bmatrix} \mathbf{0} \\ \mathbf{I} \end{bmatrix}}_{\mathbf{B}} \mathbf{J}\hat{\omega}_e, \quad (8)$$

e a saída do observador de estados completos é o erro de estimação de corrente, dado por

$$\tilde{\mathbf{i}} = \underbrace{[\mathbf{I} \ \mathbf{0}]}_{\mathbf{C}} \begin{bmatrix} \tilde{\mathbf{i}} \\ \tilde{\mathbf{e}} \end{bmatrix}. \quad (9)$$

Para garantir a estabilidade do sistema e um bom desempenho dinâmico de estimativa, a técnica de alocação de polos pode ser utilizada. O comportamento do observador de estados devido ao erro de estimação no domínio da frequência é dado por,

$$\tilde{\mathbf{i}} = \mathbf{G}(s) \mathbf{J}\hat{\omega}_e, \quad (10)$$

onde

$$\mathbf{G}(s) = \frac{\mathbf{C}[s\mathbf{I} - \mathbf{A}]^{-1}\mathbf{B}}{-L^{-1}\mathbf{I}} = \frac{\mathbf{C}[s\mathbf{I} - \mathbf{A}]^{-1}\mathbf{B}}{s^2\mathbf{I} + (a_1\mathbf{I} + a_2\mathbf{J})s + a_3\mathbf{I} + a_4\mathbf{J}}, \quad (11)$$

e

$$\begin{cases} a_1 = -h_1 \\ a_2 = -\omega_e - h_2 \\ a_3 = \frac{h_3}{L} - \omega_e h_2 \\ a_4 = \frac{h_4}{L} + \omega_e h_1 \end{cases}. \quad (12)$$

A matriz de realimentação é projetada através da seguinte estratégia de alocação de polos

$$\begin{cases} h_1 = -(\alpha_1 + \alpha_2) \\ h_2 = -\hat{\omega}_e \\ h_3 = L(\hat{\omega}_e h_2 + (\alpha_1 \alpha_2)) \\ h_4 = -L\hat{\omega}_e h_1 \end{cases}, \quad (13)$$

onde α_1 e α_2 são as posições dos pares de polos no plano negativo real.

É necessário salientar que a velocidade estimada é utilizada no ganho de realimentação (13), podendo causar instabilidade no sistema se os polos forem alocados muito próximos ao eixo imaginário quando erros de estimação de velocidade ocorrerem. Assim, é desejável alocar os polos do observador em frequências mais elevadas que a velocidade nominal do fluxo rotórico do PMSM.

4. MÉTODOS DE RECONSTRUÇÃO DE VELOCIDADE

Diversos métodos de reconstrução da velocidade rotórica através da EMF observada são apresentados na literatura. Entretanto, os principais trabalhos da literatura apresentam um maior foco no projeto do observador de estados. Assim, nesse capítulo são demonstrados os principais métodos de estimação de posição e velocidade e suas vantagens e desvantagens são discutidas.

4.1 Estimação pela Derivação da Posição

Considerando que o observador de ordem completa estime com precisão o vetor de EMF, é possível reconstruir a posição rotórica do PMSM utilizando a relação angular (3). Assim, é possível estimar a posição rotórica através da seguinte equação

$$\hat{\theta}_e = \tan^{-1} \left(-\frac{\hat{e}_\alpha}{\hat{e}_\beta} \right). \quad (14)$$

Uma maneira fácil de obter a velocidade do rotor PMSM é derivar a posição estimada do rotor (Baratieri and Pinheiro (2016)), como a seguir

$$\hat{\omega}_e = \frac{d}{dt} \hat{\theta}_e. \quad (15)$$

É preciso salientar que o processo inverso, de obter a posição através da integração da velocidade não é um procedimento viável devido ao fenômeno *integration drift* (Grover (1966)). Um problema que aparece na derivação da posição é a sensibilidade a erros de medida. Assim, a derivada é substituída pelo seguinte filtro

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \vartheta \\ \hat{\omega}_e \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -\omega_c^2 & -2\omega_c \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \vartheta \\ \hat{\omega}_e \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \omega_c^2 \end{bmatrix} \hat{\theta}_e, \quad (16)$$

onde ω_c é a largura de banda do filtro e ϑ é uma estado auxiliar do filtro.

A velocidade estimada é utilizada para realimentação no observador de estados de ordem completa. Isso dificulta a análise de estabilidade do sistema devido a dificuldade de modelar a realimentação da posição e sua derivada no observador. No entanto, a simplicidade do método faz dele uma boa solução para a reconstrução da velocidade do rotor.

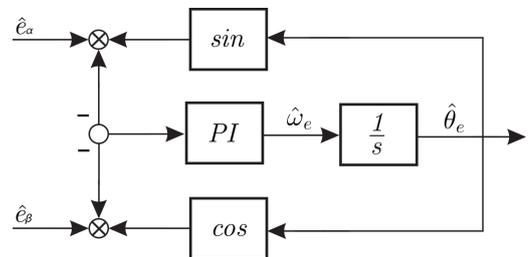


Figura 1. Estrutura de estimação via PLL.

4.2 PLL

Uma solução secundária para a reconstrução da velocidade e posição do rotor é o método PLL (Kshirsagar et al.

ritmos *sensorless* necessitam de bom desempenho transitório para aplicações de alto desempenho. Assim, as simulações são realizadas com o PMSM variando a velocidade rotórica de 20 rad/s para 190 rad/s e retornando a 20 rad/s. A resposta da estimação de velocidade é apresentada para todo experimento e a resposta de estimação de posição é focada na aceleração.

A Fig. 4 apresenta o resultado dessa simulação utilizando o método de reconstrução derivativo. Boa estimação de velocidade é observada e um pequeno erro de estimação de posição aparece na aceleração na máquina. O procedimento é repetido e apresentado na Fig. 5 utilizando o método PLL. Mais uma vez, resultados satisfatórios são obtidos no controle *sensorless*.

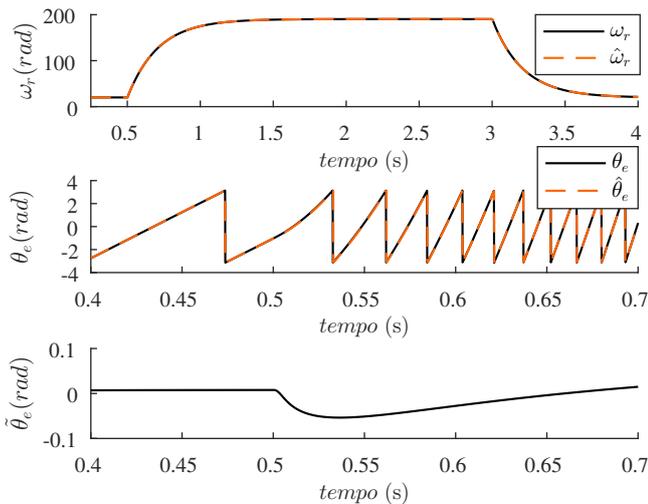


Figura 5. Resposta de simulação para o método PLL.

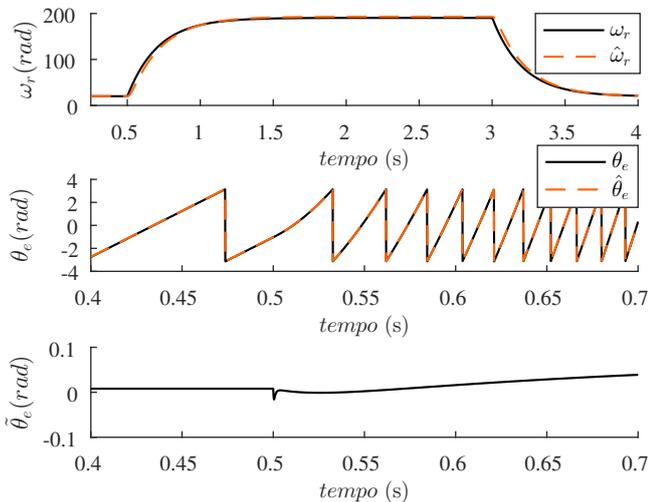


Figura 6. Resposta de simulação para o método adaptativo.

O resultado de simulação para o controle *sensorless* utilizando o método adaptativo é apresentado na Fig. 6. Bom rastreamento da velocidade e posição do PMSM são observados durante a simulação. O pequeno erro transitório de estimação não compromete a operação *sensorless* do sistema.

O desempenho dos métodos de estimação é altamente dependente dos parâmetros ω_c , k_p e k_i . Assim, uma análise completa necessitaria levar em conta os métodos de projeto das técnicas apresentadas presentes na literatura.

As três técnicas de reconstrução das variáveis mecânicas discutidas nesse trabalho são extensivamente apresentadas na literatura. Assim, era esperado que todas tivessem capacidade para estimar as variáveis desejadas. Entretanto, o método adaptativo apresenta mais flexibilidade de projeto, o tornando mais utilizado para estudo em casos especiais de operação. O grande atrativo do método PLL é de ser um método amplamente utilizado em conversores. O método derivativo se destaca pela simplicidade.

6. CONCLUSÕES

Esse trabalho apresentou uma análise dos principais métodos de reconstrução de velocidade e posição rotórica para algoritmos *sensorless* aplicados ao PMSM. O observador de estados de ordem completa é utilizado para estimar o vetor de EMF no referencial estacionário. A matriz de realimentação é projetada por um método de alocação de polos, que ajuda na estabilidade do sistema. Através desse observador, três métodos de estimação de variáveis mecânicas são revisados, são eles o método derivativo, PLL e o método adaptativo. Suas vantagens e desvantagens são discutidos. Resultados de simulação apresentam a performance dos algoritmos apresentados.

AGRADECIMENTOS

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES/PROEX) - Código de Financiamento 001. Os autores também gostariam de agradecer ao INCT-GD e as agências de fomento (CNPq Projeto 422026/2016-6, CNPq 465640/2014-1, CAPES 23038.000776/2017-54 e FAPERGS 17/2551-0000517-1)

REFERÊNCIAS

- Baratieri, C.L. and Pinheiro, H. (2014). Hybrid orientation for sensorless vector control of nonsinusoidal back-emf PMSM. In *IECON 2014 - 40th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, 621–627. doi: 10.1109/IECON.2014.7048565.
- Baratieri, C.L. and Pinheiro, H. (2016). New variable gain super-twisting sliding mode observer for sensorless vector control of nonsinusoidal back-emf pmsm. *Control Engineering Practice*, 52, 59 – 69. doi:https://doi.org/10.1016/j.conengprac.2016.04.003. URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S096706611630065X>.
- Bernardes, T., Montagner, V.F., Gründling, H.A., and Pinheiro, H. (2014). Discrete-time sliding mode observer for sensorless vector control of permanent magnet synchronous machine. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 61(4), 1679–1691. doi:10.1109/TIE.2013.2267700.
- Bolognani, S., Calligaro, S., and Petrella, R. (2014). Design issues and estimation errors analysis of back-emf-based position and speed observer for spm synchronous motors. *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in*

- Power Electronics*, 2(2), 159–170. doi:10.1109/JESTPE.2013.2296974.
- Bolognani, S., Oboe, R., and Zigliotto, M. (1999). Sensorless full-digital pmsm drive with ekf estimation of speed and rotor position. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 46(1), 184–191. doi:10.1109/41.744410.
- Bolognani, S., Tubiana, L., and Zigliotto, M. (2003). Extended kalman filter tuning in sensorless pmsm drives. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 39(6), 1741–1747. doi:10.1109/TIA.2003.818991.
- Boussak, M. (2005). Implementation and experimental investigation of sensorless speed control with initial rotor position estimation for interior permanent magnet synchronous motor drive. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 20(6), 1413–1422. doi:10.1109/TPEL.2005.854014.
- Domínguez, J.R., Navarrete, A., Meza, M.A., Loukianov, A.G., and Canedo, J. (2014). Digital sliding-mode sensorless control for surface-mounted pmsm. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 10(1), 137–151. doi:10.1109/TII.2013.2262280.
- Gabbi, T.S., Gründling, H.A., and Vieira, R.P. (2016). Sliding mode MRAS speed observer applied to permanent magnet synchronous motor with decoupled current control. In *IECON 2016 - 42nd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, 2929–2934. doi:10.1109/IECON.2016.7793641.
- Grover, D.J. (1966). Low-frequency drift reduction in the integration of repetitive signals. *Proceedings of the Institution of Electrical Engineers*, 113(5), 895–902.
- Ioannou, P.A. and Sun, J. (1995). *Robust Adaptive Control*. Prentice-Hall, Inc., Upper Saddle River, NJ, USA.
- Krishnan, R. (2009). *Permanent Magnet Synchronous and Brushless DC Motor Drives*. CRC Press.
- Kshirsagar, P., Burgos, R.P., Jang, J., Lidozzi, A., Wang, F., Boroyevich, D., and Sul, S. (2012). Implementation and sensorless vector-control design and tuning strategy for smpm machines in fan-type applications. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 48(6), 2402–2413.
- Melfi, M.J., Evon, S., and McElveen, R. (2009). Induction versus permanent magnet motors. *IEEE Industry Applications Magazine*, 15(6), 28–35. doi:10.1109/MIAS.2009.934443.
- Morawiec, M. (2013). The adaptive backstepping control of permanent magnet synchronous motor supplied by current source inverter. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 9(2), 1047–1055. doi:10.1109/TII.2012.2223478.
- Morimoto, S., Kawamoto, K., Sanada, M., and Takeda, Y. (2002). Sensorless control strategy for salient-pole pmsm based on extended emf in rotating reference frame. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 38(4), 1054–1061. doi:10.1109/TIA.2002.800777.
- Mwasilu, F., Nguyen, H.T., Choi, H.H., and Jung, J.W. (2017). Finite set model predictive control of interior pm synchronous motor drives with an external disturbance rejection technique. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 22(2), 762–773. doi:10.1109/TMECH.2016.2632859.
- Park, Y. and Sul, S.K. (2014a). Sensorless control method for pmsm based on frequency-adaptive disturbance observer. *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, 2(2), 143–151. doi:10.1109/JESTPE.2013.2296596.
- Park, Y. and Sul, S.K. (2014b). Sensorless control method for PMSM based on frequency-adaptive disturbance observer. *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, 2(2), 143–151. doi:10.1109/JESTPE.2013.2296596.
- Pillay, P. and Krishnan, R. (1989). Modeling, simulation, and analysis of permanent-magnet motor drives. i. the permanent-magnet synchronous motor drive. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 25(2), 265–273. doi:10.1109/28.25541.
- Po-ngam, S. and Sangwongwanich, S. (2012). Stability and dynamic performance improvement of adaptive full-order observers for sensorless pmsm drive. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 27(2), 588–600. doi:10.1109/TPEL.2011.2153212.
- Volpato Filho, C.J. and Vieira, R.P. (2020). Pole placement design methodology of back-emf adaptive observer for sensorless pmsm drives. *Journal of Control, Automation and Electrical Systems*. doi:10.1007/s40313-019-00539-x.
- Wang, Z., Lu, K., and Blaabjerg, F. (2012). A simple startup strategy based on current regulation for back-emf-based sensorless control of pmsm. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 27(8), 3817–3825. doi:10.1109/TPEL.2012.2186464.
- Zaim, S., Nahid-Mobarakeh, B., and Meibody-Tabar, F. (2014). Robust position sensorless control of nonsalient pmsm at standstill and low speeds. *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, 2(3), 640–650. doi:10.1109/JESTPE.2014.2307277.