



Estudo sobre Máquinas Síncronas de Ímãs Permanentes

Study on Permanent Magnet Synchronous Machines

Guilherme Henrique Fagundes*, Alessandro Goedtel†,

Marcelo Favoretto Castoldi‡,

RESUMO

A dependência do petróleo e derivados pelos diferentes tipos de transporte e maquinários no mundo tem obrigado os países a desenvolverem combustíveis e máquinas mais limpas, sustentáveis e eficientes, devido aos grandes impactos ambientais gerados pelos elementos tradicionais. Nos últimos anos, o desenvolvimento de alternativas mais eficientes e ecológicas tem ganhado força, destacando-se nesse cenário os motores elétricos, em especial os motores síncronos de ímãs permanentes. O uso dessa máquina está em expansão devido suas características, possuindo os requisitos básicos para ser uma solução dos problemas acima citados. O presente artigo visa o desenvolvimento de pesquisas sobre os motores síncronos de ímãs permanentes, abordando suas características construtivas, funcionamento, modelagem matemática e simulação, visto seu grande potencial de crescimento e ascensão no mercado. Uma revisão de literatura foi realizada com o intuito de adquirir os conhecimentos básicos sobre a máquina e simulações foram feitas no *Matlab/Simulink* a partir de modelos disponíveis. Dessa forma, foi comparado a teoria as simulações, validando o modelo e vislumbrando o funcionamento real da máquina. Por fim, cotações com fornecedores desses tipos de máquinas foram feitas, já que o objetivo futuro do projeto é a montagem de uma bancada de experimentos com esse motor na UTFPR.

Palavras-chave: máquinas síncronas, ímãs permanentes, funcionamento, simulação.

ABSTRACT

Dependence on oil and oil products by different transport and machinery has forced countries to develop cleaner, more sustainable and efficient fuels and machines due to the significant environmental impacts of traditional elements. In recent years, the development of more efficient and ecological alternatives has gained impulse, with electric motors standing out in this scenario, especially permanent magnet synchronous motors. The use of this machine is expanding due to its characteristics, having the basic requirements to solve the problems mentioned above. This paper aims to research permanent magnet synchronous motors, approaching their constructive characteristics, operation, mathematical modeling and simulation, considering their highest growth potential and rise in the market. A literature review was carried out to acquire basic knowledge about the machine, and simulations were made in *Matlab/Simulink* from available models. In this way, the simulations were compared to theory, validating the model and envisioning the accurate functioning of the machine. Finally, quotations were made with potential suppliers of these types of machines, since the future objective of the project is to build an experiment test bench with this machine at the UTFPR.

Keywords: synchronous machines, permanent magnets, functioning, simulation.

1 INTRODUÇÃO

Nos últimos anos, muito se fala sobre a dependência do petróleo e derivados dos meios de transporte e maquinários no mundo, evidenciando os prejuízos ambientais causados por eles. Isso tem obrigado os países

* Engenharia Elétrica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Cornélio Procopio, Paraná, Brasil; guilhermefagundes@alunos.utfpr.edu.br

† Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Campus Cornélio Procopio; agoedtel@utfpr.edu.br

‡ Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Cornélio Procopio, Paraná, Brasil; marcastoldi@utfpr.edu.br



a investirem mais no desenvolvimento de alternativas mais eficientes e ecológicas para substituírem as tradicionais, e nesse cenário destacam-se os motores elétricos (GARCÍA, 2020). Esses motores elétricos possuem os requisitos básicos para serem soluções para os problemas atuais: poluição gerada pelos veículos tradicionais e máquinas defasadas ineficientes.

Uma classe de motores elétricos em especial tem se destacado nos últimos anos: motores síncronos de ímãs permanentes. As características construtivas das máquinas de ímãs permanentes e suas formas de controle são complexas, porém são esses fatores que possibilitam vantagens até mesmo em relação as máquinas elétricas mais utilizadas no mercado atualmente, no que diz respeito a eficiência e rendimento. Além disso, esses motores possuem baixo volume e peso, torque suave, baixo nível de vibração e ruído e ampla faixa de rotação com torque constante (WEG, 2020).

O presente artigo tem como objetivo analisar as máquinas síncronas de ímãs permanentes, a partir de revisões de literatura, abordando suas características, tipos, funcionamento, modelagem matemática e simulações via software, que serão realizadas a fim de validar a teoria com os modelos que simulam o comportamento real da máquina.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 Aspectos construtivos

Nas máquinas síncronas de ímãs permanentes o enrolamento de armadura trifásico está nas ranhuras do estator, enquanto os ímãs são colocados no rotor. Resumindo, trata-se de uma máquina trifásica de corrente alternada síncrona, onde os enrolamentos do rotor são substituídos por um ímã permanente que fornece um fluxo rotórico constante (GARCÍA, 2020). Dois tipos principais dessas máquinas surgem de acordo com a disposição dos ímãs no rotor.

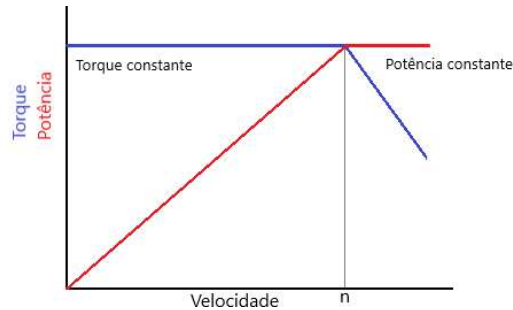
Os motores com ímãs superficiais caracterizam os motores de polos lisos. Esses motores não atuam acima da velocidade nominal com potência constante, devido à baixa indutância resultante no seu entreferro. Já os motores de ímãs internos, ou motores de polos salientes fornecem um maior torque resultante, devido a componente de relutância gerada pelas saliências do rotor. Por consequência, o motor é capaz de atuar acima da velocidade nominal com potência constante.

2.2 Funcionamento

A velocidade síncrona é obtida a partir de uma interação entre o campo magnético girante e o campo magnético constante. As bobinas do estator são alimentadas por uma tensão trifásica, produzindo um campo magnético girante com velocidade síncrona. No rotor temos os ímãs permanentes, responsáveis por gerar um fluxo magnético constante (WEG, 2020). Segundo Wang e Zang (2019), quando o rotor tiver uma rotação inicial, no mesmo sentido do campo girante do estator, os polos opostos do campo girante e do ímã do rotor irão se atrair, criando um acoplamento magnético entre os dois. Isso significa que o rotor vai girar com a mesma velocidade do campo girante, a velocidade síncrona, proporcional a frequência de alimentação e os aspectos construtivos da máquina. Os motores síncronos de ímãs permanentes são acionados por meio de inversores de frequência.

A curva característica de um motor de ímãs permanentes internos (IPMSM), apresenta duas faixas de funcionamento. Em velocidades abaixo da velocidade nominal (n), o motor consegue atuar com torque constante em uma ampla faixa de velocidades. Da mesma forma, acima da velocidade nominal, a mesma atua com potência constante. Dessa forma, o motor funciona com velocidade constante independente da carga no seu eixo. A descrição acima está representada na Fig. 1.

Figura 1 - Curva característica do IPMSM.



Fonte: Autoria própria (2021).

3 MÉTODO DE PESQUISA

Uma revisão bibliográfica de livros e artigos científicos disponíveis em meios eletrônicos foi realizada, em conjunto com simulações em software. A metodologia de revisão de literatura forneceu o embasamento teórico necessário para o entendimento da máquina, sempre buscando referências atuais de artigos apresentados em congressos e periódicos, além de livros sobre máquinas elétricas.

As simulações realizadas através do software *Matlab/Simulink* utilizam modelagens matemáticas e modelos de acionamento de motores disponíveis na literatura atual, com pequenas modificações. Esses modelos mostram o comportamento da máquina, como elas atuam com mudanças de parâmetros e formas de controles variadas. Etapa de extrema importância para analisar a máquina e prever seu funcionamento da vida real.

3.1 Modelagem matemática do motor síncrono de ímãs permanentes

A modelagem matemática de motores elétricos possibilita descrever e analisar o comportamento das máquinas a partir de suas grandezas elétricas, magnéticas e mecânicas relacionadas através de equacionamento matemático (GARCÍA, 2020). As equações matemáticas serão descritas a seguir conforme Wang e Zang (2019). A Figura 2 a seguir representa o modelo físico do IPMSM. O entreferro desse motor não é uniforme, logo as indutâncias variam de acordo com o ângulo de giro do rotor.

A tensão nos enrolamentos do estator (u_a, u_b, u_c) são dadas por:

$$\begin{aligned} u_a &= R_s i_a + \frac{d\psi_a}{dt} \\ u_b &= R_s i_b + \frac{d\psi_b}{dt} \\ u_c &= R_s i_c + \frac{d\psi_c}{dt} \end{aligned} \quad (1)$$

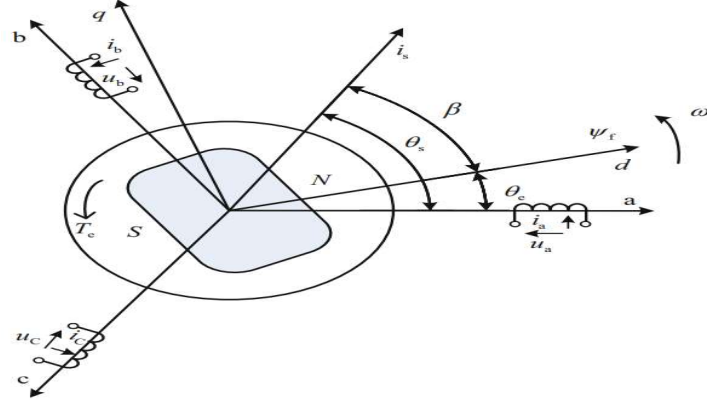
Onde R_s é a resistência de enrolamento do estator, ψ é o fluxo de dispersão nas três fases, p é o operador diferencial d/dt e i_a, i_b, i_c são as correntes do estator.

O fluxo de fuga é representado da seguinte maneira:

$$\begin{aligned} \psi_a &= L_a i_a + M_{ab} i_b + M_{ac} i_c + \psi_{fa} \\ \psi_b &= M_{ba} i_a + L_b i_b + M_{bc} i_c + \psi_{fb} \\ \psi_c &= M_{ca} i_a + M_{cb} i_b + L_c i_c + \psi_{fc} \end{aligned} \quad (2)$$

Onde ψ_{fa}, ψ_{fb} e ψ_{fc} é o fluxo do ímã permanente nos enrolamentos das fases a, b, c, respectivamente e ψ_f é o fluxo do ímã permanente. Como mencionado, nesse tipo de máquina as indutâncias variam de acordo com o giro do rotor (θ_e). Temos que L_{s0}, L_{s2}, M_{s0} e M_{s2} são o valor médio e a segunda harmônica da auto indutância e da indutância mútua, respectivamente. Observe que nas fases b e c, a defasagem deve ser considerada.

Figura 2 - Modelo físico do IPMSM.



Fonte: Wang e Zang (2019).

Como as indutâncias variam de acordo com o ângulo do rotor, a tensão também será função variante no tempo. A análise do funcionamento do motor a partir dessas equações torna-se muito difícil devido a dependência angular. Para facilitar a análise, o recurso das transformadas de coordenadas foi utilizado. A Transformada de Clarke tem por função transformar as grandezas trifásicas em um sistema de duas variáveis estacionárias. Aplicando essa transformada nas Eq. (1) e Eq. (2):

$$\begin{aligned} u_\alpha &= R_s \cdot i_\alpha + \Psi_\alpha' \\ u_\beta &= R_s \cdot i_\beta + \Psi_\beta' \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \Psi_\alpha &= L_{\alpha\beta} \cdot i_\alpha + \Psi_f \cdot \cos\theta_e \\ \Psi_\beta &= L_{\alpha\beta} \cdot i_\beta + \Psi_f \cdot \sin\theta_e \end{aligned} \quad (4)$$

Assim as tensões (u_α, u_β), correntes (i_α, i_β) e fluxo de dispersão (Ψ_α, Ψ_β) são representados em função do eixo de transformadas $\alpha\beta$. Temos que $L_{\alpha\beta}$ é a matriz de transformação.

A Equação (4) mostra que a indutância e o fluxo ainda dependem do ângulo do rotor. Assim, aplicando uma segunda transformada, a Transformada de Park, as equações tornam-se função do eixo de coordenadas dq , que gira em sincronismo com o rotor. Logo, as grandezas deixam de depender da variação desse ângulo, uma vez que elas estão girando em sincronismo com o rotor. Aplicando a Transformada de Park nas Eq. (3) e Eq. (4):

$$\begin{aligned} u_d &= R_s \cdot i_d + p \cdot \Psi_\beta + \omega_e \cdot \Psi_q \\ u_q &= R_s \cdot i_q + p \cdot \Psi_\alpha - \omega_e \cdot \Psi_d \end{aligned} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} \Psi_d &= L_d \cdot i_d + \Psi_f \\ \Psi_q &= L_q \cdot i_q \end{aligned} \quad (6)$$

Temos que o fluxo de dispersão (Ψ_d, Ψ_q), tensão (u_d, u_q) e correntes (i_d, i_q) agora são funções do eixo que gira em sincronia com o rotor, deixando de depender do ângulo. Assim, a tensão no estator é obtida pela soma vetorial de u_d, u_q e V_s . Por fim, o torque da máquina de ímãs permanentes internos conta com uma componente extra devido a saliência do rotor, o torque de relutância. A equação de torque eletromagnético (T_e) é:

$$T_e = \frac{3}{2} \cdot P_n [\Psi_f \cdot i_q + (L_d - L_q) \cdot i_d \cdot i_q], \quad (7)$$

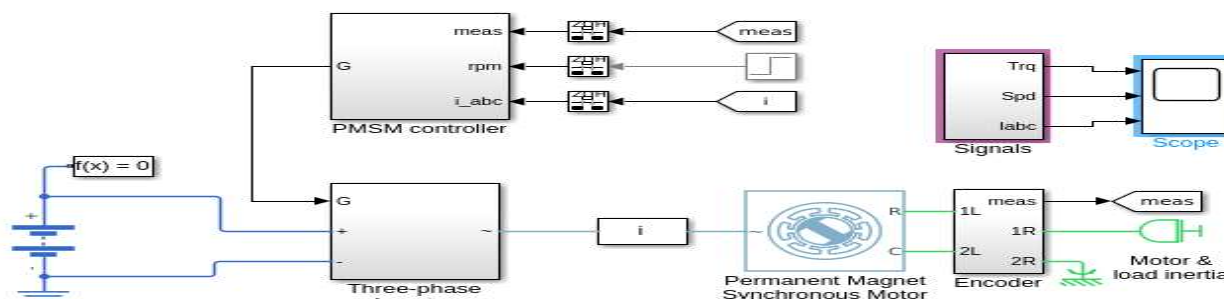
Onde P_n é o número de par de polos da máquina.

3.2 Simulação do motor síncrono de ímãs permanentes

A simulação dos motores junto a sua modelagem matemática é importante para prever seu funcionamento. Antes de acionarmos o mesmo em uma bancada real, as simulações se tornam imprescindíveis para evitar problemas maiores, minimizar custos com protótipos, economizar tempo e otimizar o projeto.

O software *Matlab/Simulink* foi utilizado para realização das simulações. O motor modelado na seção anterior é representado pelo bloco “*ee_pmsm_drive*” do *Matlab/Simulink*. O inversor do bloco realiza o controle do motor através do método de campo orientado com constante de controle de velocidade. Esse inversor é alimentado por uma bateria, na qual a tensão de entrada é convertida em tensões trifásicas que alimentam a máquina. Na saída do bloco temos um encoder, responsável por medir o ângulo de torque e o torque de referência, através de sensores ideais (MATHWORKS, 2019). Veja a seguir na Fig. 3 o esquemático do bloco:

Figura 3 - Bloco “*ee_pmsm_drive*” do *Matlab/Simulink*.



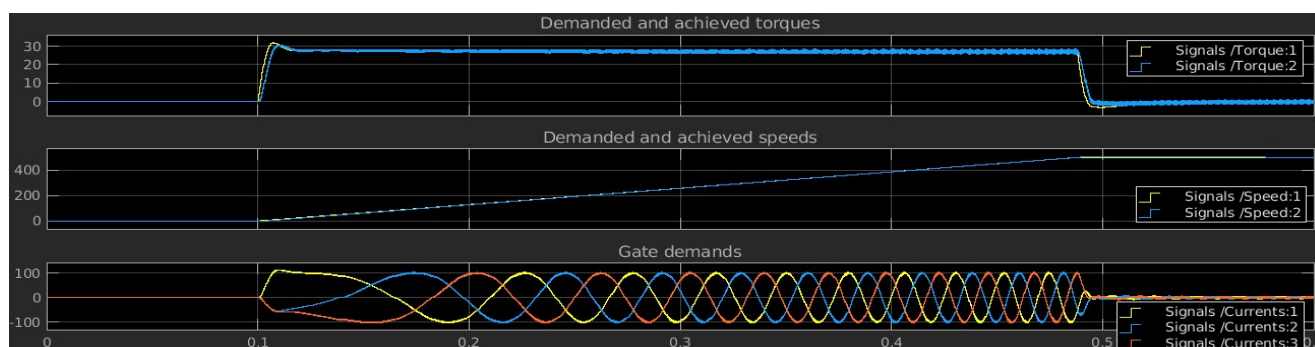
Fonte: *Matlab/Simulink* adaptado (2021).

4 RESULTADOS

A partir da simulação do bloco observa-se o funcionamento do motor. Suas grandezas de saída, disponíveis no “scop” são observadas na Figura 4. Como esperado, os resultados seguem o valor de referência (curva amarela) do controle de campo orientado com controle de velocidade, ilustrando a eficácia do método.

No início, o motor ainda está na sua partida pelo inversor. Após 0,1 segundos apenas que o mesmo entra em regime permanente. Percebe-se que o torque é constante enquanto a velocidade aumenta, uma característica desse motor, idem a Fig. 4. A partir de um certo tempo e frequência, o torque cai para zero e a velocidade permanece constante. É a frequência de corte do motor e também o ponto de velocidade nominal. Depois dessa frequência, o motor passa operar na área de enfraquecimento de fluxo. Vale ressaltar que não temos uma carga aplicada nesse caso. Outra forma de analisar o comportamento do motor seria alterando a forma de controle, substituindo o controle atual por outro tipo, mais adequado para tal aplicação da máquina.

Figura 4 - Resultados de simulação.



Fonte: *Matlab/Simulink* adaptado (2021).



Se alterarmos as grandezas do motor (indutâncias e fluxo do ímã) dentro bloco ou a carga inicial aplicada, verifica-se a mudança nessas grandezas de saída também. Nesse caso, o torque sofre uma pequena variação, Vale lembrar que esses parâmetros são de difíceis modificações, já que são aspectos construtivos da máquina.

5 CONCLUSÃO

Os motores elétricos estão presente nas indústrias, empresas e até mesmo residências. Suas vantagens energéticas e ambientais em relação aos motores tradicionais são evidentes, tornando-se as máquinas do futuro. Em especial, os motores síncronos de ímãs permanentes devem ser estudados, já que eles apresentam vantagens até mesmo em relação a outras classes de motores elétricos. A primeira parte desse artigo buscou conceitos para o entendimento sobre máquinas síncronas de ímãs permanentes, desde sua composição, funcionamento e operações básicas. Com a simulação da máquina, modelada matematicamente, no *MatLab/Simulink* foi possível comparar as características teóricas da máquina com seu comportamento real, validando o modelo apresentado e descrito.

Por fim, a cotação de motores síncronos de ímãs permanentes ainda deve ser melhorada, já que o objetivo desse trabalho é montar uma bancada de teste com esse motor de ímãs permanentes no laboratório LSI da UTFPR-CP. Essa cotação será muito importante, pois com os dados levantados da máquina poderemos simular um bloco com os mesmos parâmetros da máquina real, aproximando ainda mais o ambiente de simulação do ambiente real.

AGRADECIMENTOS

Ao CNPq (Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico) pelo auxílio financeiro através da bolsa de estudos e a Universidade Tecnológica Federal do Paraná, campus de Cornélio Procopio, pela estrutura para o desenvolvimento do projeto, além do apoio por parte dos professores orientadores.

REFERÊNCIAS

GARCÍA, Raymundo Cordero. **Controle de precisão do motor síncrono de ímã permanente usando redes neurais artificiais**. Monografia (graduação) – Universidade Federal Rural do Semiárido. Campo Grande, 2009. Disponível em: <https://repositorio.ufms.br/handle/123456789/657>. Acesso em 21 de dezembro de 2020.

KRISHNAN. R. **Electric Motor Drives – Modeling, Analysis and Control**. Prentice Hall. 2001. Disponível em: https://www.academia.edu/R_Krishnan_Electric_Motor_Drives_Modeling_Analysis_and_Control_2001 . Acesso em 20 de março de 2020.

MATHWORKS. PMSM. **Permanent magnet synchronous motor with sinusoidal flux distribution**. Matlab, 2019. Disponível em: <https://www.mathworks.com/help/physmod/sps/ref/pmsm.html>. Acesso em: 07 de junho de 2021.

WANG, Gaolin; ZANG, Guoqiang; XU, Dianguo. **Position Sensorless Control Techniques for Permanent Magnet Synchronous Machine Drives**. 2019. Springer. Acesso em 29 de junho de 2021.

WEG EQUIPAMENTOS ELÉTRICOS S.A. **Motor de Ímãs Permanentes e Inversor de Frequência WEG**. Departamento de P&D do Produto. 2020. Disponível em: <https://static.weg.net/medias/downloadcenter/hce/h39/WEG-motor-de-imas-permanentes-e-inversor-de-frequencia-artigo-tecnico-portugues-br.pdf>. Acesso em 15 de dezembro de 2020.