



Identificação de Parâmetros em Máquinas Síncronas de Fluxo Axial e Imãs Permanentes com o Algoritmo do Vagalume

Raphael Carvalho da Silva e Silva
Bolsista

Prof. Dr. Mateus Giesbrecht
Orientador

Resumo

Neste artigo tem-se como objetivos estudar, analisar e identificar os parâmetros de uma máquina síncrona de imãs permanentes. Busca-se inovação ao se trabalhar com um motor de fluxo axial e ao propor a determinação dos parâmetros do circuito equivalente por meio do recente Algoritmo do Vagalume. De início, será construído um modelo da máquina real em Simulink®. Em sequência, será aplicado o Algoritmo do Vagalume para determinação dos parâmetros da máquina simulada. Em terceiro lugar, serão realizadas melhorias e incrementos no modelo original. Finalmente, será desenvolvido um método capaz de estimar com exatidão parte dos parâmetros de máquina.

Palavras-chave

Máquinas síncronas de fluxo axial, Identificação de parâmetros de máquinas síncronas, Algoritmo do vagalume

1. INTRODUÇÃO

Recentemente, o interesse por máquinas síncronas de imãs permanentes (PMSM, do inglês *permanent magnet synchronous machine*) de fluxo axial vem aumentando significativamente [11, 12, 13, 15], uma vez que essas máquinas podem ser projetadas para uma maior relação de conjugado por peso e alta eficiência, podendo ser consideradas significativamente mais vantajosas em relação às PMSM de fluxo radial [2]. Assim, as PMSM de fluxo axial têm sido utilizadas em aplicações que visam alto desempenho e em que não se dispõe de uma grande dimensão axial para a instalação da máquina, tal como nas aplicações de motores nos interiores de rodas [7].

A determinação dos parâmetros físicos de máquinas síncronas é de grande importância para o desenvolvimento de algoritmos de controle, tanto em regime permanente quanto em condições transitórias de operação [3]. Uma boa estimativa para os parâmetros auxilia diretamente na obtenção dos modelos dinâmicos desejados para esses estudos [10].

O problema de otimização originado pelo problema de determinação de parâmetros de máquinas síncronas pode ser resolvido com diversas meta-heurísticas inspiradas na natureza. Dentre essas meta-heurísticas estão os Algoritmos Genéticos [4], fundamentados nas ideias de adaptação e evolução expostas por Charles Darwin. Este método converge para resultados interessantes, como é provado na referência [10], em que o método é utilizado para a determinação de parâmetros de uma máquina síncrona e [8] em que uma variante do método é utilizada para a determinação de parâmetros de sistemas dinâmicos em geral. Outra meta-heurística que já foi aplicada para a solução do problema de determinação de parâmetros de máquinas elétricas é o Algoritmo de Enxame de Partículas [5] que, quando aplicado ao problema de estimação de parâmetros de máquinas síncronas, também converge para resultados de alta precisão [6]. Nesta pesquisa, optou-se pelo Algoritmo do Vagalume [14] em primeiro lugar, por se tratar de um método heurístico mais recente do que os dois anteriores. Em segundo lugar, o Algoritmo do Vagalume se mostrou mais rápido e mais simples quando comparado com o Algoritmo Genético para a solução do problema de calibração de modelos [1].

2. OBJETIVOS

O principal objetivo desta pesquisa é a determinação de um método capaz de estimar com exatidão parte dos parâmetros de uma máquina síncrona de fluxo axial e imãs permanentes, tomando como principais ferramentas um ensaio de aplicação de degrau de corrente de armadura e o Algoritmo do Vagalume.

3. METODOLOGIA

3.1 O Modelo

Na figura 1 é apresentado o modelo utilizado para as simulações computacionais. A máquina é alimentada por uma fonte trifásica ideal, onde é aplicado um degrau de tensão em 0.1s com tensão final igual a 50 Vrms. Na entrada de conjugado aplicou-se um degrau com subida em 1s e valor final igual a 100Nm. Foi incorporado um bloco para realiza-



ção da medição das tensões de fase da máquina, utilizadas para os cálculos nas rotinas de análise. A análise detalhada do modelo é descrita em [9].

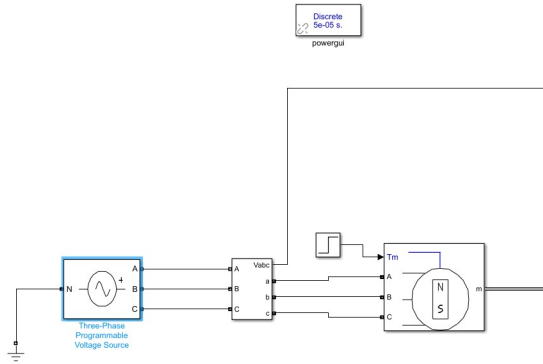


Figura 1: Diagrama de blocos referente ao modelo em Simulink utilizado para o estudo

3.2 O Algoritmo do Vagalume

O Algoritmo do Vagalume formulado por Yang [14] em 2008 é classificado como um algoritmo meta-heurístico e baseia-se no comportamento dos vagalumes e na sua capacidade de bioluminescência para comunicação. Para implementação do algoritmo, devem ser seguidas três regras, como descreveu Yang:

- Todos os vagalumes são unissexuais, de maneira que um vagalume é atraído por outro independentemente do gênero;
- A Atratividade é proporcional ao brilho, de tal forma que o vagalume cujo brilho seja menos intenso será atraído por outro com brilho mais intenso. Caso não exista diferença de intensidade, os vagalumes irão se mover aleatoriamente.
- O brilho de um vagalume é afetado ou determinado pelo panorama da função objetivo

3.2.1 Intensidade de Luz e Atratividade de um Vagalume

A Atratividade e a intensidade de luz $I(r)$ de um vagalume varia de acordo com a distância r_{ij} entre o vagalume i e o j como demonstra a equação (9):

$$I(r) = \frac{I_s}{r^2} \quad (1)$$

Onde, I_s é a intensidade de luz na fonte e r pode ser assumida como a distância Cartesiana entre o vagalume i e o j . Dessa maneira, para o caso bidimensional:

$$r_{ij} = \sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2} \quad (2)$$

Para o caso mais simples, onde deseja-se encontrar o valor máximo de um problema de otimização, a intensidade de luz I de um vagalume em uma localização particular \mathbf{x} pode ser escolhida como $I(\mathbf{x}) \propto f(\mathbf{x})$, em que $f(\mathbf{x})$ é a função objetivo do problema de otimização. Desta forma, a intensidade de luz influencia diretamente na atratividade, dado que o vagalume i se tornará mais atrativo para j o quanto mais intenso for seu brilho

Assim, a Atratividade β é relativa, uma vez que depende de como é vista por vagalumes adjacentes. Desta maneira, existem dois fatores que irão influenciar na Atratividade: a distância r_{ij} entre dois vagalumes e a absorção de luz pelo meio em que os vagalumes estão inseridos. Assim, pode-se definir β como demonstrado na equação (11):

$$\beta = \beta_0 e^{-\gamma r_{ij}^2} \quad (3)$$

Onde, γ é o coeficiente de absorção de luz e β_0 é a atratividade quando $r_{ij} = 0$. Cabe observar que a escolha do valor para o parâmetro γ é de fundamental importância, uma vez que irá determinar a velocidade de convergência além do comportamento do Algoritmo do Vagalume [14].

3.2.2 O Movimento dos Vagalumes

Uma vez descrita a forma como os vagalumes se comportam no meio, cabe descrever como se dará seu movimento. Assim, o movimento de um vagalume i em uma posição \mathbf{x}_i em direção a um vagalume j em uma posição \mathbf{x}_j com intensidade de luz superior, é dado pela equação (12):

$$\mathbf{x}_i = \mathbf{x}_i + \beta_0 e^{-\gamma r_{ij}^2} (\mathbf{x}_j - \mathbf{x}_i) + \alpha \epsilon_i \quad (4)$$

Onde o segundo termo de (16) é referente à atração ao passo que o terceiro termo representa uma aleatorização, sendo α o parâmetro de aleatorização e ϵ_i um vetor de números aleatórios. Desta maneira, o movimento do vagalume que possui maior intensidade de luz será descrito pela equação (17):

$$\mathbf{x}_i = \mathbf{x}_i + \alpha \epsilon_i \quad (5)$$

3.2.3 Algoritmo do Vagalume

Uma vez avaliadas as principais características e cada uma das variáveis que operam no Algoritmo do Vagalume, pode-se ter uma visão mais abrangente do seu funcionamento através do pseudo código apresentado na *Figura 2*:



Algoritmo do Vagalume

Função objetivo $f(x)$, $x = (x_1, \dots, x_d)^T$
 Gerar população inicial de vagalumes $x_i = (i = 1, 2, \dots, n)$
 Intensidade de Luz I_i em x_i é determinada por $f(x_i)$
 Definir o coeficiente de absorção de luz γ
 while ($t < \text{MaxGeneration}$)
 for $i = 1 : n$ todos os n vagalumes
 for $j = 1 : n$ todos os n vagalumes (laço interno)
 if ($I_i < I_j$), Mover o vagalume i na direção do vagalume j ;
 end if
 Variar a Atratividade com a distância através de $\exp[-\gamma r]$
 Avaliar novas soluções e atualizar a intensidade de luz
 end for j
 end for i
 Classificar os vagalumes e encontrar o atual melhor global g_*
 Incrementar o contador de gerações t
 end while
 Análise de resultados e visualização

Figura 2: Pseudocódigo do Algoritmo do Vagalume

4. RESULTADOS

4.1 Resultados do algoritmo do vagalume

A seguir, são demonstrados os resultados obtidos da simulação e otimização com o Algoritmo do Vagalume. Pode-se observar as curvas obtidas com os parâmetros encontrados pelo algoritmo após a 11ª iteração nas figuras nas figuras 3, 4, 5 e 6. Nas curvas de tensão e corrente dos eixos direto e em quadratura da máquina, nota-se que o erro quadrático médio entre o valor real e o valor estimado pelo método foi bem baixo. Os valores encontrados para L e λ e os erros entre os valores reais e os valores estimados são apresentados na tabela 1. Considera-se o erro aceitável, ainda mais considerando a velocidade da convergência do sistema [1].

Tabela 1: Parâmetros encontrados com o Algoritmo do Vagalume

L (H)	λ	$erro_L$ (%)	$erro_\lambda$ (%)
0.0004	0.1216	1.2	1.8

Na tabela 2, podem ser observados os valores dos meta-parâmetros utilizados para a estimação através do Algoritmo do Vagalume:

Tabela 2: Meta-parâmetros utilizados no Algoritmo do Vagalume

γ	α	ϕ	n
0.00001	0.0005	0.89	25

5. CONCLUSÕES

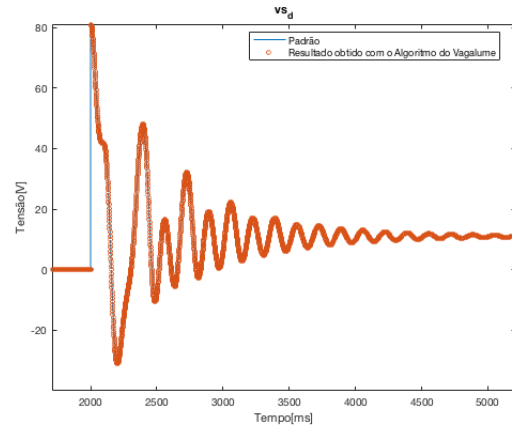


Figura 3: Componente de eixo direto das tensões extraídas diretamente do Simulink e calculadas pelo método proposto.

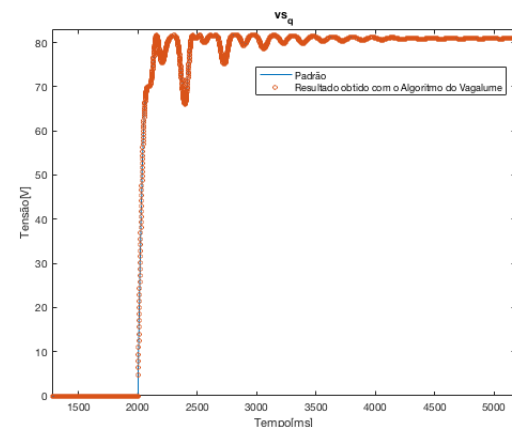


Figura 4: Componente de eixo em quadratura das tensões extraídas diretamente do Simulink e calculadas pelo método proposto.

O objetivo central deste artigo foi o desenvolvimento de um método para estimar parâmetros de máquinas síncronas de ímãs permanentes utilizando a meta-heurística conhecida como algoritmo do vagalume. O algoritmo foi utilizado para encontrar os parâmetros da máquina a partir de sua resposta a um degrau de corrente, buscando os parâmetros de máquina que forneciam a saída com menor erro em relação a resposta da máquina. Através da montagem experimental virtual, chegou-se a um método, capaz de estimar com exatidão parte dos parâmetros de máquina. Apesar de não ter sido possível realizar os testes do algoritmo com dados obtidos em bancadas experimentais reais, foram criadas rotinas para extrair as informações necessárias ao algoritmo

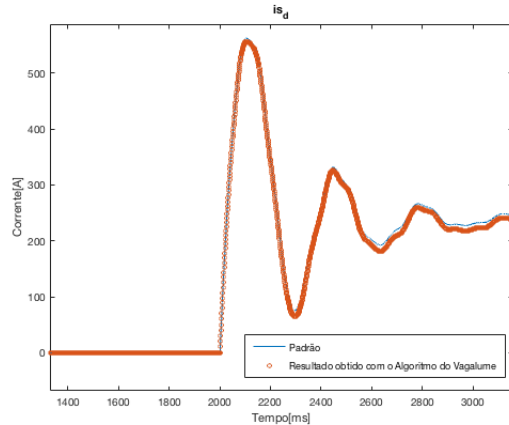


Figura 5: Componente de eixo direto das correntes extraídas diretamente do Simulink e calculadas pelo método proposto.

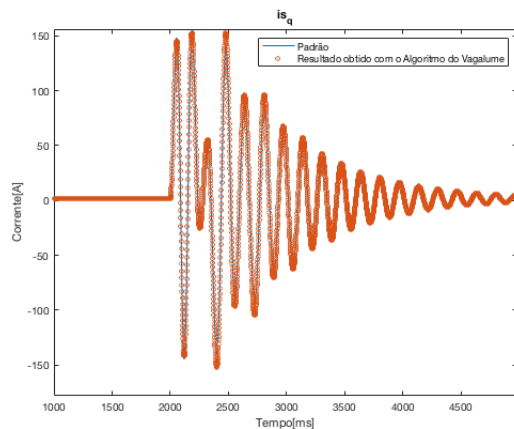


Figura 6: Componente de eixo em quadratura das correntes extraídas diretamente do Simulink e calculadas pelo método proposto.

a partir de dados que estariam disponíveis em uma implementação real, tais como tensões e correntes de estator em coordenadas abc e velocidade do rotor. Sendo assim, o algoritmo proposto pode ser utilizado com dados reais assim que estes estiverem disponíveis. Os resultados de estimação utilizando o algoritmo apresentaram um desvio máximo de menos de 2% para os parâmetros elétricos, comprovando a exatidão do método empregado.

6. REFERÊNCIAS

- [1] K. Attia, M. Nassar, M. El-Zeiny, and A. Serag. Firefly Algorithm versus Genetic Algorithm as powerful variable selection tools and their effect on different multivariate calibration models in spectroscopy: A comparative study. *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*, 170, 07 2016.
- [2] M. Aydin, , and T. A. Lipo. Torque quality and comparison of internal and external rotor axial flux surface-magnet disc machines. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 53(3):822–830, June 2006.
- [3] E. da Costa Bortoni and J. A. Jardini. Identification of synchronous machine parameters using load rejection test data. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 17(2):242–247, June 2002.
- [4] J. H. Holland. *Adaptation in Natural and Artificial Systems*. University of Michigan Press, Ann Arbor, MI, 1975. second edition, 1992.
- [5] J. Kennedy and R. Eberhart. Particle swarm optimization. In *Proceedings of ICNN'95 - International Conference on Neural Networks*, volume 4, pages 1942–1948 vol.4, Nov 1995.
- [6] Y. Ma, L. Zhou, J. Wang, J. Zhao, L. Shentu, and Y. Xiao. A new parameters identification method for novel synchronous condenser based on particle swarm algorithm and wavelet transform. pages 593–597, 10 2018.
- [7] Z. Rahman. Evaluating radial, axial and transverse flux topologies for ‘in-wheel’ motor. In *Power Electronics in Transportation (IEEE Cat. No.04TH8756)*, pages 75–81, Oct 2004.
- [8] A. E. Robles Robles et al. Métodos evolutivos e de subespaços para identificação de sistemas multivariáveis lentamente variantes no tempo. 2018.
- [9] R. C. S. Silva. Identificação de parâmetros em máquinas síncronas de fluxo axial e ímãs permanentes com o algoritmo do vagalume. Relatório Parcial de Iniciação Científica. Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação, Universidade Estadual de Campinas, 2020.
- [10] P. V. V. Silva, E. C. Bortoni, and E. J. J. Rocha. Identification of synchronous machines parameters using genetic algorithm and load rejection test. In *2017 IEEE Power Energy Society General Meeting*, pages 1–5, July 2017.
- [11] Q. Wang, H. Yu, M. Wang, and X. Qi. An improved sliding mode control using disturbance torque observer for permanent magnet synchronous motor. *IEEE Access*, 7:36691–36701, 2019.
- [12] W. Wang, H. Shen, L. Hou, and H. Gu. \mathcal{H}_∞ robust control of permanent magnet synchronous motor based on PCHD. *IEEE Access*, 2019.
- [13] Y. Xu, M. Wang, W. Zhang, and J. Zou. Sliding mode observer for sensorless control of surface permanent magnet synchronous motor equipped with LC filter. *IET Power Electronics*, 12(4):686–692, 2018.
- [14] X.-S. Yang. *Nature-Inspired Metaheuristic Algorithms*.



Luniver Press, 2008.

- [15] J. Ye, J. Yang, D. Xie, B. Huang, and H. Cai. Strong robust and optimal chaos control for permanent magnet linear synchronous motor. *IEEE Access*, 7:57907–57916, 2019.