

<https://eventos.utfpr.edu.br//sicite/sicite2019>

Estimação de parâmetros de motores de indução trifásicos utilizando o algoritmo *Simulated Annealing*

Parameters estimation of three-phase induction motors using the algorithm *Simulated Annealing*

RESUMO

Motores de indução trifásicos são comumente utilizados no setor industrial, devido a sua eficiência frente aos diversos ambientes e aplicações aos quais são submetidos e alta performance em suas operações. Mesmo assim estão sujeitos a falhas, necessitam de manutenção, isto acarreta custos indesejados. Manutenções preditivas são métodos que visam a capacidade de prever as falhas de uma máquina e o avanço tecnológico tem proporcionado o surgimento de novas ferramentas capazes de auxiliar com rigor e precisão. O presente trabalho possui o objetivo de propor uma metodologia de estimação de parâmetros, utilizando a metaheurística *Simulated Annealing*, baseado no modelo do circuito elétrico equivalente do motor de indução trifásico. O algoritmo utilizado se diferencia das demais metaheurísticas devido a sua capacidade de evitar ótimos locais. Os resultados apresentam os valores de parâmetros encontrados no estudo proposto e são comparados com os valores reais conhecidos de um motor, concluindo que a abordagem adotada produz resultados satisfatórios.

PALAVRAS-CHAVE: *Simulated Annealing*. Motor de Indução. Estimação de parâmetros

Agnes Fernanda Ferreira Rezende
feh_agnes@hotmail.com
Universidade Tecnológica Federal do Paraná.
Cornélio Procópio, Paraná, Brasil

Cristiano Marcos Agulhari
agulhari@utfpr.edu.br
Universidade Tecnológica Federal do Paraná.
Cornélio Procópio, Paraná, Brasil.

Jacqueline Jordan Guedes
jacqueline@alunos.utfpr.edu.br
Universidade Tecnológica Federal do Paraná.
Cornélio Procópio, Paraná, Brasil.

Alessandro Goedel
agoedel@utfpr.edu.br
Universidade Tecnológica Federal do Paraná,
Cornélio Procópio, Paraná, Brasil.

Recebido: 19 ago. 2019.

Aprovado: 01 out. 2019.

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



ABSTRACT

Three-phase induction motors are commonly used in the industrial sector, due to their efficiency to the different environment and applications which are subjected and high performance in operations, but even though they are subject to failures, being necessary to have maintenance, which brings unwanted costs. Predictive Maintenance are methods that try to predict the machine's failures. The technological advance has provided the appearance of new tools able to assist with rigor and accuracy. This work proposes a parameters estimation methodology, using Metaheuristic Simulated Annealing, based on the electric circuit equivalent model of the motor. The algorithm utilized differs from the other metaheuristics, due to ability to avoid optimal places. The results show the values from the founded parameters in the proposed study and are compared with the real values known from a motor, concluding that the adopted approach provides a satisfactory result.

KEYWORDS: Simulated Annealing. Induction Motor. Parameters estimation.

INTRODUÇÃO

Motores de indução trifásicos são amplamente utilizados no setor industrial, devido à sua robustez frente aos diversos ambientes nos quais ele é instalado, pela facilidade de manutenção e o baixo custo para sua aquisição (BAZAN et al., 2016). São responsáveis por aproximadamente 68% do consumo energético industrial e totalizam 35% da energia consumida no Brasil (SAUER et al., 2015).

Apesar da alta eficiência destas máquinas, elas estão sujeitas a diversos desgastes devido as condições as quais são submetidas, referentes a cargas ou o ambiente de operação, e isto afeta o desempenho da máquina, acarretando em gastos e prejuízos para o processo industrial (AGULHARI et al., 2017).

A manutenção preditiva avalia equipamentos enquanto ainda estão em funcionamento, procurando monitorar variáveis e prever possíveis falhas. Se faz importante no âmbito de economia de uma indústria, visto que uma parada de máquina ocasiona custos e os motores possuem significativa participação no cenário energético (LEME, 2017). Uma das ferramentas para identificação de possíveis falhas é a estimativa de parâmetros também estudadas nos trabalhos de BOUDISSA (2012) e DUAN (2016). No presente estudo é apresentada uma proposta de estimativa dos parâmetros do circuito elétrico equivalente do MIT utilizando o algoritmo *Simulated Annealing*.

A estimativa de parâmetros é realizada a partir de uma representação da máquina elétrica, onde se pode inferir valores de resistência e indutância do motor (SANTOS, 2013). Com o avanço da tecnologia, foram desenvolvidos algoritmos para realizar a estimativa com mais rigor e mais facilidade do que os métodos clássicos já conhecidos.

O *Simulated Annealing*, algoritmo utilizado neste trabalho, é um método de busca aleatória, fundamentado no processo recozimento dos metais e é utilizado para problemas de otimização global. A metaheurística é explicada como sendo uma forma de busca local, que requer uma procura na vizinhança e uma análise de custo de solução.

O empecilho dos métodos metaheurísticos é que estão sujeitos a ficarem presos em ótimos locais que podem não ser ótimos globais de uma função. Segundo (MAFARJA, 2017) o diferencial do algoritmo estudado se encontra na possibilidade de evitar o problema de estagnação em ótimos locais, sendo assim, a cada iteração há uma probabilidade que permite aceitar ou não uma solução que seja pior do que a atual.

O *Simulated* é análogo ao processo de recozimento dos metais, onde se modifica a temperatura do metal, com a finalidade de produzir cristais perfeitos. O algoritmo inicia com uma solução aleatória ou previamente estabelecida e uma temperatura inicial. Deseja-se minimizar a energia dos elementos de um vetor, por meio de uma função *fitness*, que é a comparação entre uma solução nova e outra antiga. É realizada então, uma exploração na vizinhança da solução atual (TORRES, 2014).

Uma nova solução é aceita se atender a um dos requisitos:

- a) Se o grau de energia do novo elemento for menor que o atual, então ocorre a troca pela nova solução;

- b) Se o novo elemento possuir maior energia, a probabilidade dele se tornar a solução atual depende de uma expressão denominada probabilidade de Boltzman que está ilustrada na Equação 1 abaixo.

$$p = e^{-\frac{\Delta E}{T}} \quad (1)$$

Onde “ ΔE ” é a variação de energia
“ T ” é a temperatura

A cada iteração do algoritmo há um decréscimo da temperatura, o que torna menor a possibilidade de novas soluções piores serem aceitas. A execução do código é realizada até se atingir um critério de parada, que comumente é o número de iterações.

METODOLOGIA

O estudo deste trabalho foi realizado no ambiente de programação Matlab®/Simulink. O modelo do circuito elétrico equivalente do motor de indução foi utilizado em conjunto com o algoritmo. Por meio do circuito elétrico equivalente foi possível realizar a aquisição de valores de corrente para auxiliar na estimação dos parâmetros. Os valores estimados são: Resistência do estator (R_1), Resistência do rotor (R_2), Indutância do estator (L_1), Indutância do rotor (L_2) e Indutância mútua (L_m).

O modelo do algoritmo original utiliza como critério de parada a quantidade de iterações realizadas. Para tornar a convergência mais precisa e alcançar resultados mais exatos, a metodologia proposta fez o uso do erro médio quadrático, uma ferramenta comum na estatística empregada para estimadores.

Inicialmente o algoritmo SA é configurado com os parâmetros iniciais necessários, que correspondem à temperatura inicial e a solução inicial. Neste trabalho foi adotada como solução inicial para o algoritmo um vetor de zeros, a cada iteração é realizada uma busca dentro de um intervalo estipulado para cada um dos parâmetros e pode-se ou não adotar uma nova solução que substitua a anterior. Após a execução do código são encontrados valores de resistência e indutância. Conhecendo-se a tensão aplicada no motor e os novos parâmetros encontrados é possível calcular o valor de corrente e obter um gráfico de corrente estimada. Em conjunto com o SA é realizada a simulação do circuito elétrico equivalente do motor, que foi configurado inicialmente com os parâmetros reais da máquina, obtém-se então a forma de onda de corrente para os parâmetros originais. Os valores de corrente estimados e originais são comparados, utilizando o erro quadrático médio, o processo é repetido até que o erro seja menor ou igual a 1% e assim encontra-se os valores de parâmetros que satisfaçam esse critério.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A estimação foi realizada para um motor de 5HP, os resultados obtidos se encontram na Tabela 1 a seguir, que contém os valores dos parâmetros reais e estimados bem como a porcentagem de erro para cada um deles.

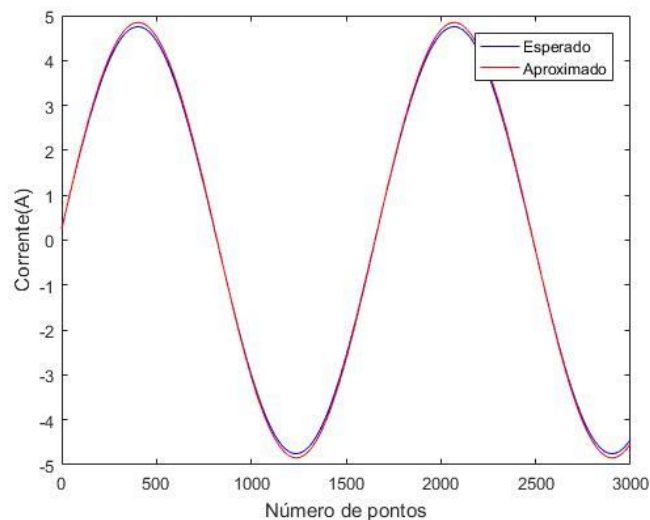
Tabela 1 – Comparação dos parâmetros estimados para o motor de 5HP

Modelo do Motor: 5HP 460V 60Hz 1750RPM					
	$R_1 (\Omega)$	$R_2 (\Omega)$	$L_1 (H)$	$L_2 (H)$	$L_m (H)$
Parâmetros estimados	1,170	1,096	0,006273	0,006077	0,2002
Parâmetros reais	1,115	1,083	0,005974	0,005974	0,2037
Diferença	5,00%	0,63%	5,00%	4,34%	0,56%

Fonte: Autoria própria.

A Figura 1 a seguir mostra a comparação das curvas de corrente elétrica amostrada através do circuito equivalente e a estimada obtida do algoritmo *Simulated Annealing*.

Figura 1 – Curva de corrente real e estimada



Fonte: Autoria própria

Pode-se observar pela imagem acima que houve uma boa aproximação do algoritmo com a corrente elétrica amostrada no Simulink, respeitando o critério do erro quadrático médio de 1%. Através da Tabela 1, confirma-se esta abordagem, verificando que a diferença percentual entre os parâmetros reais e estimados não possuíram divergências significativas.

CONCLUSÃO

A estimação de parâmetros é uma das alternativas utilizadas na análise e diagnóstica de falhas em máquinas elétricas. O avanço tecnológico possibilitou que novas abordagens fossem adotadas para auxiliar neste processo, como exemplo as metaheurísticas, que são métodos eficientes de otimização, em particular o *Simulated Annealing* que devido ao seu diferencial fornece resultados satisfatórios e de alta confiabilidade. Empregando estes novos métodos em prol da identificação de parâmetros de uma máquina, obtém-se bons resultados, como observado neste trabalho, que pode colaborar para a melhoria das técnicas de manutenção dos processos industriais.

REFERÊNCIAS

AGULHARI, C. M.; CASTOLDI, M.F.; GOEDEL, A.; GUEDES, J. J.; SANCHES, D.S. **Parameters estimation of three-phase induction motors using differential evolution**. Electric Power Systems Research, Elsevier, v. 154, p. 204–212, 2018.

BAZAN, G.H.; ENDO, W.; GODOY, W.F.; GOEDEL, A.; PALÁCIOS, R.H.C.; SCALASSARA, P.R. **Stator Short-Circuit Diagnosis in Induction Motors Using Mutual Information and Intelligent Systems**. IEEE Transactions on Power Electronics, IEEE, v. 29, n. 2, p. 3237 - 3246, 2018.

BOUDISSA, E.; BOUNEKHLA, M. **Genetic algorithm with dynamic selection based on quadratic ranking applied to induction machine parameters estimation**. Electric Power. Components and Systems, Taylor & Francis, v. 40, n. 10, p. 1089–1104, 2012.

DUAN, F.; ŽIVANOVIĆ, R. **Induction motor stator fault detection by a condition monitoring scheme based on parameter estimation algorithms**. Electric Power Components and Systems, Taylor & Francis, v. 44, n. 10, p. 1138–1148, 2016.

LEME, M.O. **Metodologia de manutenção preditiva para motores elétricos baseada em monitoramento de variáveis físicas e análise multicritério**. 2017. Tese (Doutorado em Engenharia de Produção) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Ponta Grossa.

MAFARJA, M.M. MIRJALILI, S. **Hybrid Whale Optimization Algorithm with simulated annealing for feature selection, Neurocomputing** .2017. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.neucom.2017.04.053>>

SAUER, I. L.; TATIZAWA, H.; SALOTTI, F. A. M.; MERCEDES, S. S. **A comparative assessment of Brazilian electric motors performance with minimum efficiency standards**. Renewable and Sustainable Energy Reviews, Elsevier, v. 41, p. 308 – 318, 2015.

TORRES, O. H.B. **Otimização de amplificadores operacionais cmos por metaheurísticas**. São Carlos. 2014. 115pág.