

Estimação de parâmetros elétricos de um motor de indução trifásico utilizando algoritmo evolutivo

Electrical parameters estimation of three-phase induction motor using evolutionary algorithm

RESUMO

Heloisa Oliveira dos Santos
hsantos@alunos.utfpr.edu.br
Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Cornélio Procópio, Paraná, Brasil

Iolanda Ortiz Bernardes
ibernardes@alunos.utfpr.edu.br
Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Cornélio Procópio, Paraná, Brasil

Marcelo Favoretto Castoldi
marcastoldi@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

Este trabalho consiste no estudo da estimação dos parâmetros elétricos de um motor de indução trifásico (MIT), tendo sua análise sido executada quando o mesmo opera em regime permanente. Tal estimação foi realizada por meio de um algoritmo evolucionário do grupo das metaheurísticas populacionais, sendo este o algoritmo de evolução diferencial (ED). Tendo em vista que este motor apresenta grande importância no cenário energético nacional, seu controle e acionamento devem ser adequados e para isso seus parâmetros devem ser considerados. Por fim, o algoritmo tem como finalidade estimar os parâmetros elétricos do MIT por meio da minimização de uma função objetivo que compara a corrente estatística de fase estimada com a corrente de fase real simulada. Para isso, simulações computacionais foram realizadas no software MATLAB® para o motor de 5 HP. Os valores obtidos para a estimação dos parâmetros via ED foram satisfatórios alcançando erros relativos inferiores a 9% para a maior frequência de amostragem considerada.

PALAVRAS-CHAVE: Estimação de parâmetros. Evolução diferencial. Motor de indução trifásico.

ABSTRACT

This work consists in the study of the indication of the electric of a three-phase induction motor (MIT), having its analysis made at the same time that the operation is permanent. This bid was performed by means of an evolutionary algorithm of the population metaheuristics group, which is the differential evolution (ED) algorithm. Since this engine is of great importance in the national energy scenario, its control and performance must be good and necessary. Finally, the algorithm has to estimate the MIT electrical parameters by minimizing a function that compares an estimated phase statistical current with a simulated real phase current. For this, computer simulations were performed using the MATLAB® software for the 5 HP engine. The values obtained for the analysis of the parameters were obtained with the number of tests corresponding to 25% for a higher sampling frequency, ie the worst case analyzed.

KEYWORDS: Parameters estimation. Differential evolution. Three-phase induction motor.

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.



INTRODUÇÃO

Possuindo construção simples, robustez, fácil manutenção e baixo custo, o Motor de Indução Trifásico (MIT) com rotor do tipo gaiola de esquilo se tornou a principal máquina no setor industrial quando o assunto é conversão de energia elétrica em mecânica motriz (KOSOW, 2005). Estudos apontam que no Brasil, os motores elétricos são responsáveis por aproximadamente 35 % do consumo total de eletricidade, sendo que 68% deste consumo corresponde somente a indústria (SAUER et al., 2015).

Segundo Viana et al. (2012), tais máquinas podem apresentar elevado rendimento, cerca de 90%, porém, há situações onde este número é bem menor. A principal causa para a redução deste rendimento é o dimensionamento inadequado do MIT, minimizando significativamente a eficiência energética da máquina (CUI et al., 2014). Para que o funcionamento do motor seja eficaz é necessário que o acionamento e controle do mesmo sejam específicos para a sua aplicação e, para que isso ocorra, os parâmetros da máquina devem ser considerados. Estes dados podem ser fornecidos pelo fabricante, porém, devido à condição de operação e desgaste da máquina, estes parâmetros sofrem alterações ao longo do tempo (FORTES et al., 2013).

Frente a isso, diversas técnicas estão sendo desenvolvidas com o intuito de se estimar de maneira satisfatória os parâmetros do MIT, baseando-se em suas grandezas e por meio de metaheurísticas populacionais. Dentre elas se destaca a Evolução Diferencial, que foi o método proposto para atuar como estimador dos parâmetros elétricos de um MIT operando em regime permanente, onde tal estimação se deu por meio da minimização de uma função objetivo.

EVOLUÇÃO DIFERENCIAL

A ED foi desenvolvida por Storn e Price em 1995 para ser um otimizador de função bastante simples, confiável, versátil e extremamente eficiente para otimização contínua, onde sua modelagem é baseada nas teorias darwinianas sobre a evolução das espécies (STORN e PRICE, 1997). A modelagem do ED parte do princípio que uma população de cromossomos evolui a partir da aplicação de três operadores genéticos, mutação cruzamento e seleção (COSTA, 2015).

As equações que descrevem a dinâmica do algoritmo são:

$$x_{i,j} = x_{i,L} + rand(0,1) \cdot (x_{i,U} - x_{i,L}), \quad (1)$$

$$v_{i,g} = x_{r1,g} + F(x_{r2,g} - x_{r3,g}), \quad (2)$$

$$u_{i,g} = \begin{cases} v_{i,g} & \text{se } rand(j) \leq CR \\ x_{i,g} & \text{caso contrário} \end{cases}, \quad (3)$$

$$x_{i,g+1} = \begin{cases} u_{i,g} & \text{se } FO(u_{i,g}) \leq FO(x_{i,g}) \\ x_{i,g} & \text{caso contrário} \end{cases}. \quad (4)$$

Na Eq. (1) $x_{i,j}$ representa o vetor população inicial, $x_{i,U}$ o limite superior e $x_{i,L}$ o limite inferior. A Eq. (2) representa a mutação, onde $v_{i,g}$ é o vetor mutado, F é o fator de ponderação e $x_{r1,g}$, $x_{r2,g}$ e $x_{r3,g}$ são vetores escolhidos aleatoriamente da população. A Eq. (3) resume o operador cruzamento, sendo $u_{i,g}$ o vetor cruzado e

CR a probabilidade de cruzamento definida pelo usuário e contida no intervalo $[0,1]$, tendo a função de controlar as informações que são transmitidas dos vetores pais aos filhos. A Eq. (4) corresponde ao operador seleção, em que $x_{i,g+1}$ é um novo vetor população inicial que pode ser igual ao vetor cruzado ($u_{i,g}$) caso o valor da sua função objetivo FO seja menor que o valor da função objetivo do vetor população inicial ($x_{i,g}$), caso contrário quem ocupa a posição i é $x_{i,g}$, mas isso acontece apenas para casos em que se deseja minimizar a função objetivo. Dessa maneira, terminado o processo de atualização da população que será considerada na próxima geração, os operadores genéticos (mutação, cruzamento e seleção) são repetidos até que seja atingido algum critério de parada, normalmente especificado pelo número máximo de gerações.

MATERIAL E MÉTODOS

Neste trabalho foi considerado apenas um motor, o MIT de 5 HP da plataforma Simulink do programa MATLAB®. O MIT utilizado na tem 4 polos, frequência de 60 Hz, tensão nominal 220/380, resistência do estator (R_1) de 1,1150 Ω , resistência do rotor (R_2) de 1,0830 Ω , indutância do estator (L_1) de 0,005974 H, Indutância do rotor (L_2) de 0,005974 H, indutância mútua (L_M) de 0,2037 H.

Utilizando os valores de corrente e de tensão de fase do estator, a velocidade e o tempo obtidos a partir da simulação do MIT, pode-se estimar os parâmetros elétricos (R_1, R_2, L_1, L_2 e L_M) de tal máquina por meio da minimização de uma Função Objetivo (FO).

Tal FO é definida como uma função de diferença entre as curvas da corrente simulada e a estimada, ponto a ponto, em regime permanente e considerando apenas dois períodos da curva. Essa função está representada pela Eq (5).

$$FO = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left(\frac{IS_i - IE_i}{IS_i} \right)^2 \quad (5)$$

onde, N corresponde ao número de pontos analisados; IS à corrente simulada; e IE à corrente estimada pelo algoritmo.

Para que a análise não se limitasse apenas a precisão dos parâmetros estimados e levasse em consideração o valor do *fitness*, realizou-se a FO com diferentes frequências de amostragem (discretização). É importante destacar que o *fitness* é definido como o argumento mínimo da FO. Além disso, avaliou-se também quantos pontos de operação do motor eram necessários considerar no cálculo do *fitness*, tendo em vista que existem infinitas soluções que satisfazem um único ponto de operação do MIT. Vale ressaltar que o *fitness* para este trabalho foi utilizado para realizar a comparação entre as os resultados com as taxas de amostragem propostas.

Por fim, para este trabalho foram utilizados 4 diferentes frequências de amostragem e 3 diferentes pontos de operação para a máquina, sendo eles: 100%, 75% e 50% de carga nominal. O valor de F foi de 0,2 e o de CR foi de 0,5 e tais constantes foram determinadas de forma empírica. Além disso, para as implementações, os parâmetros do MIT foram pré-definidos entre os seguintes intervalos: $0 \leq R_1$ e $R_2 \leq 5$; $0 \leq L_1$ e $L_2 \leq 0,008$; e $0 \leq L_M \leq 0,5$. A população inicial foi constituída por 15 cromossomos com 5 genes cada, correspondendo, respectivamente a R_1, R_2, L_1, L_2 e L_M . Esta foi submetida aos operadores

genéticos (mutação, cruzamento e seleção) e como critério de parada foi considerado um número máximo de 110 gerações.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os melhores valores obtidos para os parâmetros do MIT estimados pela ED são apresentados na Tabela 1, onde as quatro frequências de amostragem foram consideradas. Tal algoritmo foi executado por 100 vezes para cada frequência, e calculou-se a mediana de todos os parâmetros, tomando os valores medianos obtidos como valores finais para a estimação.

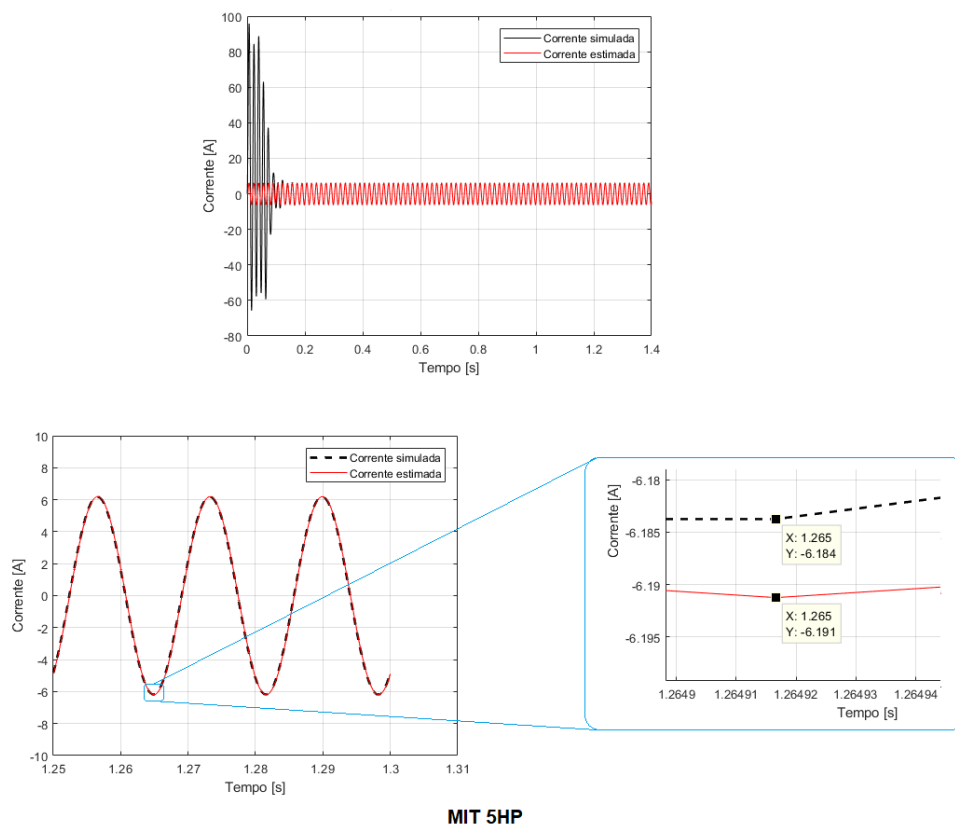
Tabela 1 – Parâmetros estimados através da ED para o motor simulado de 5 HP.

	Análise 1		Análise 2		Análise 3		Análise 4	
	3 kHz		6 kHz		9 kHz		12 kHz	
	Valor	Erro [%]	Valor	Erro [%]	Valor	Erro [%]	Valor	Erro [%]
R_1 [Ω]	0,8423	24,4574	0,9825	11,8834	1,3060	17,1300	1,1065	0,7623
R_2 [Ω]	1,0952	1,1265	1,0941	1,0249	1,0866	0,3324	1,0890	0,5540
L_1 [H]	0,0049	17,9779	0,0051	14,6301	0,0054	9,6083	0,0057	4,5865
L_2 [H]	0,0058	2,9126	0,0061	2,1091	0,0069	15,5005	0,0065	8,8048
L_M [H]	0,2033	0,1964	0,2023	0,6873	0,2034	0,1473	0,2030	0,3436
Fitness	$2,1336 \cdot 10^{-4}$		$2,1128 \cdot 10^{-4}$		$1,0252 \cdot 10^{-4}$		$7,3514 \cdot 10^{-5}$	

Fonte: Autoria própria (2019).

Com base na Tabela 1 pode-se observar que quanto maior a frequência de amostragem menor é o valor do fitness, o que indica que melhores são os parâmetros estimados. No entanto, de modo geral, comparando com os trabalhos anteriores, precursores deste, nota-se que os erros relativos percentuais foram menores, e, conseqüentemente, a estimação foi melhor, principalmente na frequência de 12 kHz, pois o maior erro foi de 8,8048% para o parâmetro L_2 . Este resultado pode ser melhor observado na Figura 1, onde é apresentada a curva de corrente do MIT de 5 HP quando analisado a uma frequência de 12 kHz.

Figura 1 - Curvas de corrente do MIT de 5 HP na Análise 4.



MIT 5HP

Fonte: Autoria própria (2019).

Analisando a Figura 1 nota-se uma boa aproximação entre as curvas de corrente simulada e estimada, porém, através do *zoom*, é possível verificar que a sobreposição das curvas não é exata apresentando um erro na ordem de 10^{-2} . Desse modo, comprova-se tanto de forma quantitativa quanto de forma qualitativa que a estimação de parâmetros foi condizente em regime permanente para o motor de 5 HP na frequência de 12 kHz.

CONCLUSÃO

Pode-se concluir que o presente trabalho apresentou resultados satisfatórios quanto a estimação dos parâmetros elétricos do MIT de 5 HP via ED. Esta análise pode ser confirmada por meio dos dados descritos na Tabela 1, onde os parâmetros estimados para a análise de 12 kHz, apresentaram erros relativos inferiores a 9%. Além disso, pode-se perceber que não é necessário fornecer uma grande quantidade de pontos de operação ao algoritmo, uma vez que o mesmo conseguiu estimar consideravelmente bem os parâmetros com apenas três condições de operação. Por isso, a pesquisa terá continuidade e, futuramente, pretende-se utilizar a ED para estimar os parâmetros elétricos de MITs reais, a fim de se comprovar a robustez do mesmo.

AGRADECIMENTOS

Os envolvidos neste trabalho agradecem à UTFPR pela bolsa de iniciação científica e pelo Laboratório de Sistemas Inteligentes (LSI) da UTFPR – Campus Cornélio Procópio por toda estrutura fornecida à pesquisa.

REFERÊNCIAS

COSTA, Bruno Leandro Galvão. **Metaheurísticas de otimização aplicadas na sintonia de controladores PI de um acionamento DTC-SVM para motores de indução trifásicos**. 2015. 127 f. Dissertação de Mestrado. PPGEI, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Cornélio Procópio.

CUI, Gang et al. Optimization design of high efficiency variable frequency induction motor based on finite element analysis. In: 2014 **17th International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS)**. IEEE, 2014. p. 701-705.

FORTES, Marcio Zamboti; FERREIRA, Vitor Hugo; COELHO, Alex Palma Francisco. The induction motor parameter estimation using genetic algorithm. **IEEE Latin America Transactions**, v. 11, n. 5, p. 1273-1278, 2013. ISSN 1548-0992.

GUEDES, Jacqueline Jordan et al. **Parameters estimation of three-phase induction motors using differential evolution**. Electric Power Systems Research, v. 154, p. 204-212, 2018. ISSN 0378-7796.

KOSOW, Irving L. **Máquinas Elétricas e Transformadores**. 15 ed. São Paulo: Globo, 2005.

SAUER, Ildo L et al. A comparative assessment of Brazilian electric motors performance with minimum efficiency standards. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 41, p. 308-318, 2015. ISSN 1364-0321.

STORN, Rainer; PRICE, Kenneth. Differential Evolution – A Simple and Efficient Heuristic for global Optimization over Continuous Spaces. **Journal of Global Optimization**, v. 11, n. 4, p. 341-359, December 01 1997. ISSN 1573-2916.

URSEM, Rasmus K; VADSTRUP, Pierré. Parameter identification of induction motors using differential evolution. **Evolutionary Computation, 2003. CEC'03. The 2003 Congress on**, 2003, IEEE. p.790-796.

VIANA, Augusto Nelson Carvalho et al. **Eficiência energética: fundamentos e aplicações**. Elektro, Universidade Federal de Itajubá, Excen, Fupai, v. 1, 2012.