

ESTIMATIVA DOS PARÂMETROS DO CIRCUITO EQUIVALENTE DO MIT UTILIZANDO EVOLUÇÃO DIFERENCIAL

F. A. S. Gonçalves, D. P. Carvalho, C. A. Bissochi Jr, F. B. Silva, W. E. Vanço, K. Yamanaka
Universidade Federal de Uberlândia, Faculdade de Engenharia Elétrica
felipeadrianosg@gmail.com, danieloak@gmail.com, fbentosival@gmail.com, bissochi.jr@gmail.com,
wagner_vanco@hotmail.com, keiji@ufu.br

Resumo - Este trabalho consiste no desenvolvimento de um software capaz de estimar os principais parâmetros de um motor de indução trifásico. Foi utilizado o software que através de poucos dados de entradas, calcular aproximadamente as variáveis (X1, X2, R2 e Xm), sendo que este processo é feito por um algoritmo que utiliza evolução diferencial. Neste trabalho é descrito todas as etapas de funcionamento do projeto proposto assim como os resultados obtidos de forma experimental.

Palavras-Chave – Algoritmos genéticos, estimativa dos parâmetros MIT, evolução diferencial, máquinas elétricas, motores de indução.

ESTIMATE OF THE MIT EQUIVALENT CIRCUIT PARAMETERS USING DIFFERENTIAL EVOLUTION

Abstract - This project is to develop software capable of estimating the main parameters of the induction motor. The software that was used by a few data entries, roughly calculate the variables (X1, X2, Xm and R2), and this process is done by an algorithm which uses differential evolution. This paper describes all operating phases of the proposed project and the results obtained experimentally.

Keywords – Genetic algorithms, MIT parameters estimate, differential evolution, electrical machines, induction motors

NOMENCLATURA

MIT Motor de Indução Trifásico
ED Evolução diferencial

I. INTRODUÇÃO

De acordo com o Boletim de Consumo de Energia Elétrica do ano de 2009 da Empresa de Pesquisa Energética (EPE) o setor industrial consome por volta de 46% de toda energia produzida no Brasil [1]. Estima-se que deste percentual os motores elétricos de indução sejam responsáveis por cerca de

50% do consumo, podendo chegar a 70% dependendo da região do país.

Uma pesquisa realizada pela CEMIG (Companhia Energética de Minas Gerais) com 3425 motores de indução trifásicos em diversos segmentos do setor industrial mostrou que 28,7% dos motores analisados operavam de forma superdimensionada e que 5,9% estavam subdimensionados. Outra pesquisa, realizada pela COPEL (Companhia Energética do Estado do Paraná) em aproximadamente 200 unidades industriais, mostrou que num total de 6108 motores analisados 37,5% encontravam-se superdimensionados, com uma carga abaixo de 70% do valor nominal [2].

Conforme demonstrado em [3] um motor que opera de forma superdimensionada apresenta uma redução no seu fator de potência e uma diminuição da sua eficiência. A análise da eficiência pode ser realizada por meio de métodos que utilizam o circuito equivalente da máquina elétrica. Normalmente, para conhecer com exatidão o circuito equivalente da máquina, ela deve ser ensaiada, ou seja, seu serviço deve ser interrompido e diversas das medidas exigem que a máquina seja desmontada para a obtenção de seus valores.

Alternativamente, podem-se estimar os parâmetros do circuito equivalente da máquina a partir de dados de entrada de fácil obtenção, os quais não exigem ensaios avançados na máquina. Existem na literatura variados métodos de estimativa dos parâmetros do circuito equivalente, tanto métodos numéricos quanto os que se utilizam de heurísticas. Neste trabalho, propõe-se a utilização de evolução diferencial para a finalidade de estimar os parâmetros do circuito equivalente.

O algoritmo utilizando evolução diferencial desenvolvido utiliza, como dados de entrada, medidas fáceis de serem adquiridas, tais como a resistência do estator, a tensão e a corrente de entrada, a velocidade do rotor com a máquina em funcionamento e a classe de operação da máquina. Com base nesses dados, o ED realiza a estimação dos valores da reatância do estator, a reatância do rotor, a reatância mútua e a resistência do rotor, sendo este último parâmetro particularmente importante, pois exerce grande influência no cálculo da potência e da eficiência do motor.

II. CIRCUITO EQUIVALENTE DO MIT

Através do circuito equivalente pode-se calcular aspectos importantes do desempenho em regime permanente de um motor de indução, tais como: variações de corrente, velocidade, perdas em função do conjugado de carga, etc. A Figura 1 mostra o circuito equivalente de um motor de indução apresentado em [4].



XIII CEEL - ISSN 2178-8308
12 a 16 de Outubro de 2015
Universidade Federal de Uberlândia - UFU
Uberlândia - Minas Gerais - Brasil

Onde:

- R1 resistência do estator,
- R2 resistência do rotor,
- X1 reatância de dispersão do estator;
- X2 reatância de dispersão do rotor;
- Xm reatância de magnetização;
- s o escorregamento.

O escorregamento representa os efeitos da carga no circuito equivalente do motor de indução. A principal vantagem em se calcular a eficiência utilizando o circuito equivalente é que se pode calcular o desempenho da máquina para qualquer carga, desde que os valores das impedâncias sejam conhecidos.

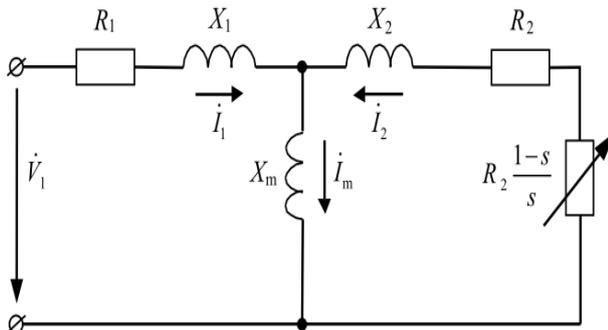


Figura 1: Circuito equivalente do motor de indução.

III. ALGORITMO GENÉTICO UTILIZADO

Os algoritmos genéticos (AG) pertencem à classe de métodos de otimização cuja aplicação é ideal para a resolução de sistema não-lineares. Os AG utilizam uma função objetiva que é baseada em critérios que envolvem a minimização de alguma métrica, como por exemplo o erro estimado. O AG utilizado para a estimação dos parâmetros do circuito equivalente do motor de indução segue os passos típicos de um algoritmo genético, sendo eles:

1. Cria-se a população inicial;
2. Calcula-se a aptidão de cada indivíduo da população (usando a função objetiva);
3. Utiliza-se uma metodologia de seleção para reprodução dos indivíduos;
4. Utiliza-se um operador de cruzamento para a criação de uma nova geração de indivíduos, de acordo com a taxa de cruzamento;
5. Aplica-se um operador de mutação aos indivíduos da nova população, de acordo com a taxa de mutação;
6. Terminar a execução do algoritmo de acordo com algum critério de parada, ou então retornar ao passo 2.

Dentre os critérios de parada mais utilizados estão um número fixo de iterações do AG (número de gerações) ou a finalização do algoritmo quando a alteração do melhor valor de aptidão for menor que um limite previamente estabelecido. Neste trabalho, o critério de parada foi um número fixo de gerações.

Para cada um dos passos do algoritmo genético, existem diversas técnicas que podem ser empregadas, desde

a representação do indivíduo, passando pelo método de seleção, até os operadores genéticos utilizados. Nas subseções a seguir, será comentada a técnica adotada para a implementação do AG neste trabalho, justificando sua escolha na aplicação de estimar os parâmetros do circuito equivalente do motor de indução.

A. População inicial e representação do indivíduo

A população inicial é usualmente gerada de maneira aleatória. Considerando que um indivíduo é, em última instância, uma possível solução para o problema em questão, deve-se entender que a criação aleatória de um indivíduo depende de sua representação.

É comum que a representação dos indivíduos (cromossomos) nos Algoritmos Genéticos seja binária, ou seja, cada gene do cromossomo é simbolizado por um bit que pode assumir o valor 0 ou 1.

Essa representação é genérica e pode ser utilizado para uma vasta gama de problemas, para os quais a solução pode ou não ser um número ou um conjunto de números. Mesmo as soluções numéricas podem ser representadas em forma binária. Entretanto, para os casos em que a solução do problema é numérica, a representação binária impõe uma limitação: o tamanho do intervalo das soluções (espaço de busca) e também a resolução das possíveis soluções sofre influência do número de bits utilizado na representação. Dessa maneira, o comprimento do cromossomo pode tornar-se arbitrariamente grande, ou a resolução da solução é ruim. Existe a possibilidade, contudo, de que os indivíduos nos Algoritmos Genéticos sejam representados por parâmetros contínuos. A solução é representada por um vetor no qual cada elemento é um número real, que pode estar limitado em um intervalo por restrições típicas do problema.

Neste trabalho, optou-se por utilizar a representação contínua para os indivíduos da população. Cada indivíduo é representado por um vetor de parâmetros do circuito equivalente buscado, ou seja, cada elemento desse vetor é um valor numérico contínuo. Um indivíduo I_i é representado da seguinte maneira:

$$I_i = [X1_i, R2_i, X2_i, X_{m_i}]$$

B. Seleção de indivíduos para reprodução

O método de seleção de indivíduos para reprodução é utilizado para escolher a quais membros da população serão aplicados os operadores genéticos (cruzamento e mutação). Essa seleção busca mimetizar o mecanismo de seleção natural observado na Natureza; por esse motivo, o método de seleção utiliza a aptidão dos indivíduos (função objetiva) para selecionar indivíduos. A aptidão é, portanto, uma medida da qualidade da solução representada por um indivíduo. Quanto maior a aptidão de um indivíduo, maior a probabilidade de que seja selecionado para reprodução.

O Método da Roleta e o Método do Torneio são métodos de seleção de indivíduos bastante utilizados. Neste trabalho, foi utilizada seleção por Torneio. Um Torneio consiste em selecionar uma pequena fração da quantidade de indivíduos da população e calcular a aptidão desses indivíduos; o indivíduo com melhor aptidão é selecionado. Repetem-se esses torneios até que tenha sido selecionado o

número de indivíduos igual ao da população. Posteriormente, a etapa de reprodução será aplicada a cada par desses indivíduos selecionados, e cada cruzamento gerará dois novos indivíduos. Assim, mantém-se constante o tamanho da população ao longo das gerações.

C. Operador de cruzamento (crossover)

Após a operação de mutação, o cruzamento é aplicado na população e para cada vetor que sofreu mutação $P_{i,q}(G+1)$, um índice $rnbr(i) \in \{1,2, \dots, n\}$ é aleatoriamente escolhido e um vetor tentativa $Pt_{i,y}(G+1)$ é gerado tal que:

$$Pt_{i,y}(G+1) = \begin{cases} P_{i,q}(G+1), & \text{se } randb(y) \leq CR \text{ ou } y = rnbr(i) \\ P_{i,q}(G), & \text{se } randb(y) > CR \text{ ou } y \neq rnbr(i) \end{cases}$$

Onde, $i=1, \dots, n$ é um índice de indivíduo da população e $y=1, \dots, n$ é a posição do indivíduo n-dimensional. Para decidir se o vetor $Pt_i(G+1)$ deve ser um membro da população na próxima geração, este é comparado com o vetor $P_i(G+1)$ correspondente. Se o vetor $Pt_i(G+1)$ apresenta uma função de aptidão melhor que a escolhida à substituição, ele a substitui; caso contrário, o vetor $P_i(G+1)$ é mantido na população.

D. Mutação

Alguns indivíduos são selecionados como genitores principais (por exemplo, $r1$) e com alguma probabilidade, cada variável do genitor principal é modificada. Neste caso, pelo menos uma variável deve ser alterada. A modificação é realizada adicionando ao valor atual da variável um fator de mutação, F , regida pela diferença entre dois valores desta variável nos outros dois genitores, ou seja,

$$P_i(G+1) = P_{i,r1}(G) + F * [P_{i,r2}(G) - P_{i,r3}(G)]$$

E. Função de aptidão

O critério de seleção dos melhores indivíduos no ED é a função de aptidão ou função objetiva. Uma função objetiva adequadamente escolhida garante que a próxima geração aproxima-se mais da solução ótima do problema.

A função objetiva utilizada neste trabalho é baseada no erro médio do fator de potência, no erro da corrente de entrada [5] e também na classe de operação da máquina, que é um valor aproximado da relação $X1/X2$. Ou seja, a função objetiva é calculada pela Eq. (7):

$$Z_1 = R_1 + iX_1 \quad (1)$$

$$Z_2 = \frac{R_2}{s} + iX_2 \quad (2)$$

$$Z_m = iX_m \quad (3)$$

$$Z_{sq} = Z_1 + \frac{Z_2 Z_m}{Z_2 + Z_m} \quad (4)$$

$$I_{1c} = \frac{V_1}{|Z_{sq}|} \quad (5)$$

$$\cos \varphi_c = \cos(\angle Z_{sq}) \quad (6)$$

$$f_{obj} = \sum_{i=1}^n \left(\frac{\cos \varphi_{c,i} - 1}{\cos \varphi_{m,i}} \right)^2 + \sum_{i=1}^n \left(\frac{I_{1c,i} - 1}{I_{1m,i}} \right)^2 + \left(\frac{X_1}{X_2} - k \right)^2 \quad (7)$$

Onde $I_{1c,i}$ e $\cos[\varphi_{c,i}]$ são calculados respectivamente por (5) e (6), utilizando os elementos calculados por (1), (2), (3) e (4). Os valores de $I_{1m,i}$ e $\cos[\varphi_{m,i}]$ são dados de entrada do ED, obtidos por medição. Neste trabalho, $n = 3$, ou seja, são utilizados valores de corrente, escorregamento e fator de potência para 3 pontos de operação distintos da máquina.

F. Dados experimentais

O algoritmo de evolução diferencial descrito nas seções anteriores foi testado com dados de seis motores de indução diferentes, para os quais o fabricante divulga os parâmetros do circuito equivalente, conforme a Tabela 1.

Tabela 1: Dados dos motores de indução utilizados nos experimentos.

Motor	Potência [cv]	Velocidade [RPM]	Pólos	k	R_1 [ohm]	X_1 [ohm]	R_2 [ohm]	X_2 [ohm]	X_m [ohm]
1	5	3499	2	1,00	2,1592	3,9771	1,5423	4,4793	103,1466
2	25	3538	2	0,58	0,1267	0,4694	0,0850	0,8438	20,8129
3	1,5	1717	4	1,00	5,9719	5,8099	3,5036	6,4865	172,2607
4	10	1761	4	1,00	0,5292	1,1989	0,2619	1,1451	29,8910
5	5	1166	6	0,78	0,7942	2,8191	0,6507	3,4092	41,5279
6	50	1186	6	0,68	0,0531	0,2443	0,0306	0,3519	7,5142

Para cada uma das máquinas elétricas da Tabela 1, foram obtidos os valores da corrente do estator ($I_{1m,i}$), do escorregamento (s) e do fator de potência ($\cos[\varphi_{m,i}]$) para três pontos de operação da máquina em questão, como mostrado na Tabela 2.

Tabela 2: medidas de três pontos de operação do Motor 6 da Tabela 1.

	I_s	s	$\cos \varphi$
Motor 1	17,3074	0,2001	0,7247
	14,9761	0,1501	0,7833
	6,871	0,0501	0,8762
Motor 2	158,1626	0,2001	0,3751
	151,7608	0,1501	0,4499
	100,6095	0,0501	0,7695
Motor 3	8,5058	0,2001	0,8519
	7,1244	0,1501	0,8797
	3,1726	0,0501	0,8829
Motor 4	75,0581	0,2001	0,5956
	68,4471	0,1501	0,6678
	36,2833	0,0501	0,862
Motor 5	30,876	0,2001	0,5011
	28,4357	0,1501	0,5782
	15,6178	0,0501	0,7799
Motor 6	357,4463	0,2001	0,3146
	347,3358	0,1501	0,3791
	252,9084	0,0501	0,6984

O algoritmo ED utiliza em sua função objetiva, para cada máquina analisada, os valores de R_1 , I_{1m} , s e $\cos[\varphi_m]$. Esses valores são aplicáveis em condições reais, pois essas medidas são de fácil obtenção. A função objetiva também leva em consideração a tensão de entrada (V), mas essa é a mesma para todos os experimentos (380 Volts). Com esses dados fornecidos à função objetiva, o ED calculará os valores de X_1 , R_2 , X_2 e X_m . Esses valores de parâmetros do circuito equivalente calculados são de difícil medição.

Após a execução do ED, os valores desses parâmetros calculados são comparados com os valores medidos encontrados na Tabela 1, como forma de averiguar a qualidade da resposta calculada pelo algoritmo.

Os parâmetros da evolução diferencial utilizados são mostrados na Figura 3. Esses valores foram ajustados empiricamente por terem sido os que geraram os melhores resultados.

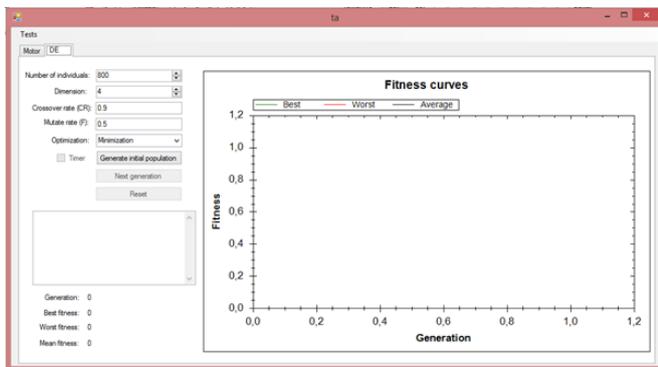


Figura 2: Interface dos parâmetros do ED.

IV. RESULTADOS

Os resultados obtidos pelo ED foram comparados com os valores de referências (valores medidos e divulgados pelo fabricante). Devido à natureza aleatória do software que utiliza evolução diferencial, os resultados apresentados são diferentes a cada execução. Por esse motivo, os resultados apresentados nas figuras abaixo.

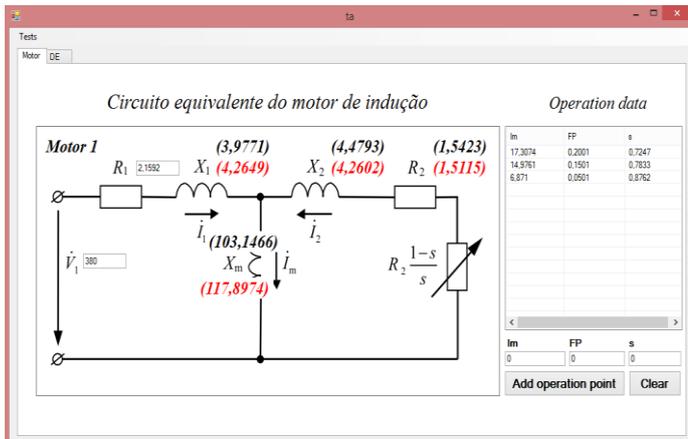


Figura 3: resultados da estimação de parâmetros do circuito equivalente do motor 1.

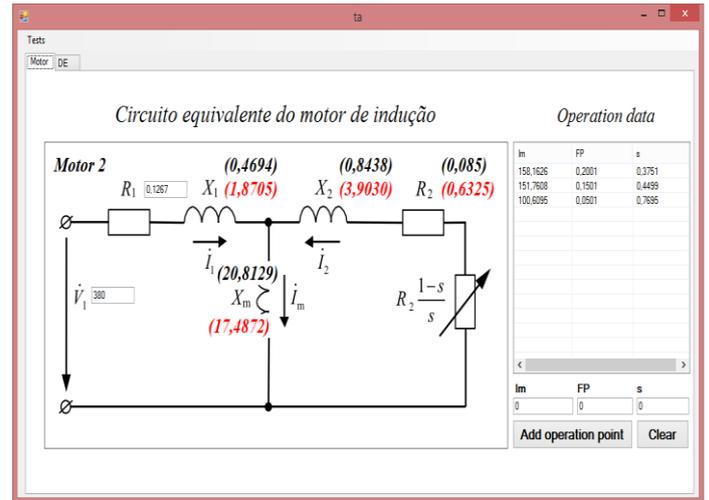


Figura 4: resultados da estimação de parâmetros do circuito equivalente do motor 2.

V. CONCLUSÕES

Este trabalho demonstrou a aplicabilidade dos ED para estimar os parâmetros do circuito equivalente do motor de indução trifásico. Baseando-se em medidas de fácil obtenção, o algoritmo estima os parâmetros de difícil obtenção. Os valores calculados pela evolução diferencial foram comparados com valores obtidos por ensaio nas máquinas. Essa comparação mostrou que os parâmetros do circuito equivalente calculados pelo algoritmo genético encontram-se numericamente muito próximos dos valores medidos. Para o parâmetro R_2 (resistência do rotor), que exerce influência direta no cálculo das potências e eficiência da máquina, o erro foi baixo para a maioria dos casos analisados.

Os resultados obtidos são encorajadores, e novas pesquisas deverão ser realizadas para melhorar ainda mais o desempenho do algoritmo. Dentre os pontos que deverão ser pesquisados no futuro, podem-se destacar: a investigação de outros fatores que podem ser adicionados à função objetiva, para eliminar o uso da relação X_1/X_2 e incluir condições de operação tais como motor funcionando a vazio e com rotor bloqueado, uso dos dados de placa, etc.; a comparação da qualidade dos resultados obtidos pelo algoritmo genético frente a outros métodos de estimação dos parâmetros do circuito equivalente; a utilização de um modelo que inclua as perdas magnéticas e rotacionais; a verificação da aplicabilidade de evolução diferencial; e a verificação do desempenho do algoritmo em um sistema de medição online.

REFERÊNCIAS

- [1] EPE, Empresa de Pesquisa Energética. Monitoramento, acompanhamento e análise do mercado de energia. [S.l.]: Empresa de Pesquisa Energética - EPE, 2009.
- [2] MARACH, Luiz Carlos. Metodologia para determinar a substituição de motores superdimensionados. Revista Eletricidade Moderna, v. 329, p. 220–229, 2001.
- [3] KOSOW, Irving L. Máquinas Elétricas e Transformadores. Rua do Curtume, 665, São Paulo, SP.: Editora Globo, 1972.

- [4] FITZGERALD, A. E.; JR., Charles Kingsley; KUSKO, Alexander. Máquinas Elétricas, cap 7. Rua Tabapuã, 1105, São Paulo, SP.: McGraw - Hill, 1975.
- [5] Phumiphak, T.; Chat-uthai, C. Estimation of induction motor parameters based on field test coupled with genetic algorithm. Proceedings of 2002 International Conference on Power System Technology PowerCon 2002. Vol. 2, Kunming, China, 10(2002), pp. 1199–1203.