

Título	Análise de Partida de Motores de Indução em Redes de Distribuição Utilizando Circuito Elétrico Equivalente Obtido por Algoritmo Evolutivo
---------------	--

Nº de Registro (Resumen)	134
---------------------------------	------------

Empresa o Entidad
Daimon Engenharia e Sistemas Companhia de Eletricidade do Estado da Bahia - COELBA

Autores del Trabajo		
Nombre	País	e-mail
André Meffe	Brasil	andre.meffe@daimon.com.br
Tania Paola Ledesma Arango	Brasil	tania.paola@daimon.com.br
Fernando Locks Lange	Brasil	lange@daimon.com.br
Fábio Sismotto El Hage	Brasil	fabioseh@daimon.com.br
Carlos Cardozo dos Santos	Brasil	ccardozo@coelba.com.br

Palabras Clave
algoritmo evolutivo, estratégia evolutiva, cargas perturbadoras, motores de indução

O objetivo deste artigo é apresentar a metodologia que foi desenvolvida para obter os parâmetros do circuito elétrico equivalente do motor de indução e analisar o impacto de sua partida em redes de distribuição em termos de carregamento e níveis de tensão, uma vez que podem ocorrer afundamentos e/ou *flicker*.

Geralmente, os fabricantes de motores não fornecem os parâmetros do circuito elétrico equivalente, o que tornaria impossível qualquer tipo de simulação baseada nesse conceito. Entretanto, os fabricantes fornecem uma série de outras informações nos dados de placa dos motores.

Para obter os parâmetros do circuito elétrico equivalente, foi utilizado um algoritmo evolutivo denominado estratégia evolutiva, cujo princípio de funcionamento é bastante similar ao de um algoritmo genético. A estratégia evolutiva simula a evolução de uma população de indivíduos cujos genes são os parâmetros do circuito elétrico equivalente. Diferente do algoritmo genético, esses genes assumem valores reais. A partir da equação de torque proveniente do circuito elétrico equivalente, é possível calcular os torques desenvolvidos por cada indivíduo da população e compará-los com os valores de placa do motor. Dessa forma, pode-se avaliar cada indivíduo da população para selecionar os melhores para produzir uma geração descendente. A função de avaliação utilizada é um somatório de erros elevados ao quadrado, sendo esses erros calculados pela diferença entre os torques de placa e os torques calculados para cada indivíduo.

Além dos torques de partida, nominal e máximo, a função de avaliação também considera as correntes de partida e nominal. Essas variáveis foram escolhidas para fazer parte da função de avaliação por serem fortemente influenciadas pelos parâmetros do circuito elétrico equivalente. Para obter uma representação mais fiel do motor de indução, considera-se o circuito elétrico equivalente com variação da resistência e reatância rotóricas em função do escorregamento, que é uma consequência do efeito pelicular e da saturação do núcleo.

INTRODUÇÃO

O efeito da partida de grandes motores de indução nas redes de distribuição de energia sempre foi um tema de interesse para os engenheiros de sistemas de potência e é por isso que se encontra na literatura uma significativa quantidade de pesquisas conduzidas nessa área, produzindo uma grande variedade de modelos para representação do motor.

Vários tipos de modelos têm sido utilizados para estudar o comportamento dos motores de indução. Entre estes, diagramas vetoriais, equações diferenciais e circuitos elétricos equivalentes são os mais significativos. Estudos estáticos e dinâmicos de motores de indução usualmente requerem o estabelecimento de um circuito elétrico equivalente.

A partir do uso de um modelo, é possível determinar o comportamento de um motor durante sua partida e, dessa forma, calcular seu respectivo impacto nas redes de média e baixa tensão. Basicamente, em um estudo de partida de motores é necessário determinar possíveis ocorrências de sobrecorrentes ou afundamentos de tensão, além de determinar se a partida será possível nas condições de nível de tensão pré-existente no ponto de conexão e de método de partida escolhido pelo cliente.

Entretanto, toda e qualquer análise de comportamento dinâmico de um motor depende do conhecimento de seu circuito elétrico equivalente. Geralmente, os parâmetros do circuito elétrico não são fornecidos pelos fabricantes de motores, os quais fornecem uma quantidade considerável de dados característicos (dados de placa) acerca de cada tipo de motor.

Neste trabalho foi desenvolvido um algoritmo evolutivo chamado Estratégia Evolutiva para determinar os parâmetros do circuito elétrico equivalente de um motor de indução a partir do conhecimento dos dados de placa fornecidos por seu fabricante. No algoritmo desenvolvido foi considerado o circuito elétrico equivalente com variação de parâmetros.

Este trabalho apresentará os circuitos elétricos equivalentes clássico e com variação de parâmetros, estabelecendo as diferenças básicas entre os dois modelos. Em seguida será apresentado o algoritmo evolutivo desenvolvido e os resultados obtidos para as curvas características de alguns motores, comparando-as com as curvas características fornecidas por seus fabricantes.

MODELOS DO MOTOR DE INDUÇÃO

Esta seção apresenta um breve resumo do modelo clássico de representação de um motor de indução através de seu circuito elétrico equivalente e, em seguida, apresenta um novo circuito elétrico equivalente que considera a existência do efeito pelicular e da saturação através da variação dos parâmetros do circuito.

Modelo Clássico

O circuito elétrico equivalente clássico [4] para representação de motores de indução está apresentado na Figura 1.

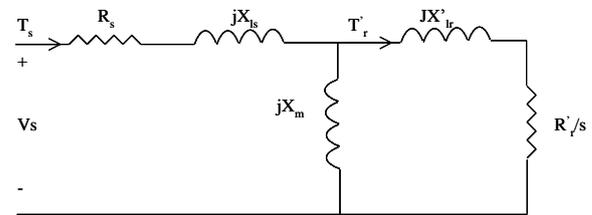


Figura 1 – Circuito Equivalente do Motor de Indução

O circuito da Figura 1 pode descrever com precisão o comportamento de estado estável do motor de indução. A resposta mecânica do motor é modelada usando (1) onde J é a medida da inércia total do rotor. O torque elétrico desenvolvido e o torque mecânico da carga (incluindo perdas) são descritos por T_e e T_m , respectivamente. A variação da velocidade w_r com o tempo durante a partida do motor é dada pela equação (1).

$$\frac{dw_r}{dt} = \frac{1}{J} \{T_e - T_m\} \quad (1)$$

O torque elétrico T_e desenvolvido pela máquina pode ser calculado a partir da corrente $I_r'^2$ que atravessa a resistência rotórica R' , utilizando a equação (2). Notar que o torque elétrico também é influenciado pelo escorregamento s e pela velocidade síncrona w_s do motor. O escorregamento, por sua vez, é calculado a partir da equação (3).

$$T_e = \frac{3I_r'^2 R'}{s w_s} \quad (2)$$

$$s = \frac{w_s - w_r}{w_s} \quad (3)$$

A análise clássica da partida de motores considera o circuito equivalente do motor de indução mostrado na Figura 1 como uma impedância que é função da velocidade do rotor. Na partida do motor o escorregamento é 1,0. A impedância equivalente do motor para esse escorregamento é então calculada e incluída no cálculo de fluxo de potência da rede, de forma a calcular as novas tensões nos terminais do motor. As novas tensões nos terminais do motor são usadas para atualizar a corrente do rotor e subsequentemente o torque elétrico desenvolvido. Esse novo torque é usado nas soluções numéricas de (1) para calcular a nova velocidade do rotor, escorregamento e impedância equivalente. Essa sequência de cálculos é repetida pelo período de tempo de interesse para determinar o desempenho do motor e do sistema de distribuição ante os eventos de

partidas de motores. Para resolver numericamente a equação diferencial (1) foi utilizado o Método Modificado de Euler [2].

Modelo com Variação de Parâmetros

Um dos principais problemas para se utilizar o circuito elétrico equivalente descrito no item anterior reside no fato de que os parâmetros de tal circuito são obtidos por meio de ensaios e dificilmente são disponibilizados pelos fabricantes de motores. Por outro lado, os fabricantes disponibilizam uma série de outras informações nos dados de placa a partir das quais é possível obter os parâmetros desejados.

Goldemberg [5] desenvolveu uma metodologia para obter os parâmetros do circuito elétrico equivalente do motor a partir de seus dados de placa. A metodologia envolve um cálculo analítico e um cálculo numérico de extrema complexidade, que por sua vez, envolve cálculo de matrizes hessianas tendo como ponto de partida o conhecimento dos fenômenos físicos que ocorrem no motor. Neste trabalho, os conhecimentos apresentados por Goldemberg são combinados com outras estratégias para a obtenção desses parâmetros.

Para a obtenção dos parâmetros do circuito elétrico equivalente será considerado que, além da resistência do rotor, outros parâmetros variam com o escorregamento, tais como as reatâncias do estator e do rotor. Além disso, os parâmetros elétricos serão obtidos não de forma analítica e sim usando um Algoritmo Evolutivo. A metodologia de cálculo dos parâmetros com algoritmo evolutivo tem como base os conhecimentos apresentados por Goldemberg.

Em seu trabalho, Goldemberg considerou dois fenômenos físicos que ocorrem nos motores de indução: o efeito pelicular e a saturação. A resistência do rotor R_2 é afetada pelo efeito pelicular. Tal efeito depende da geometria, do material das barras do rotor, da temperatura e da frequência das correntes no rotor. A reatância do rotor X_2 depende do efeito pelicular e também da saturação.

Goldemberg assumiu um ponto de vista pragmático supondo que a variação ΔR_2 é uma função apenas do escorregamento s dada pela equação (4).

$$\Delta R_2 = \Delta R_2(1) * |s|^{3/2} \tag{4}$$

A reatância X_2 depende do efeito pelicular e também da saturação. Como não se têm as informações para estabelecer quanto de ΔX_2 é devido a cada um desses efeitos, assume-se que a combinação deles pode ser expressa como função apenas do escorregamento, sendo dada pela equação (5).

$$\Delta X_2 = \Delta X_2(1) * (1 - e^{-5|s|})^2 \tag{5}$$

Consequentemente, o circuito elétrico equivalente do motor de indução passará a ser representado pelo circuito apresentado na Figura 2, que combina os circuitos válidos para condições

próximas à região nominal de operação e para as condições de partida.

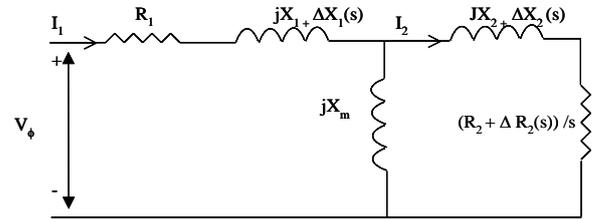


Figura 2 – Circuito Equivalente do Motor de Indução com Variação de Parâmetros

ESTRATÉGIA EVOLUTIVA

As estratégias evolutivas constituem uma classe de algoritmos evolutivos utilizadas principalmente para resolver problemas de otimização de parâmetros. Inicialmente foram utilizadas para tratar de problemas de otimização em mecânica de fluidos e, em seguida, passaram a tratar problemas de otimização de funções de forma mais genérica, focando-se no caso das funções reais [3]. Os primeiros algoritmos da estratégia evolutiva operavam com um único indivíduo na população, sujeito a mutação e seleção. Uma idéia importante introduzida nos algoritmos mais recentes é a auto-adaptação dos parâmetros da estratégia durante o processo evolutivo, através de sua introdução na representação genética dos indivíduos.

O primeiro passo para a implementação de uma estratégia evolutiva é a determinação do processo de representação dos indivíduos, o qual promove a conexão entre o problema de fato e sua codificação. Não menos importante é a escolha da função de avaliação, pois através dela os indivíduos serão avaliados e posteriormente selecionados de forma a proporcionar, geração a geração, a adequação das variáveis objetivas à solução ótima local ou global.

Um indivíduo μ qualquer é composto por dois vetores de mesmo tamanho. O primeiro é $\vec{x} \in \mathcal{R}^n$, denominado vetor de variáveis objetivas, o qual representa todas as variáveis a serem otimizadas. O outro, $\vec{\sigma} \in \mathcal{R}^n$, denominado vetor de parâmetros estratégicos, representa o potencial de alteração das variáveis durante o processo de mutação.

A idéia básica em considerar variáveis e parâmetros estratégicos em um mesmo indivíduo é a de que a cada bom indivíduo encontrado durante o processo evolutivo, são encontrados também bons parâmetros estratégicos que o conduziram a esta posição de destaque. Em outras palavras, indivíduos bem avaliados possuem baixo potencial de alteração, uma vez que eles já estão bem adaptados ao meio em que vivem. Portanto, esses indivíduos devem sofrer pequenas alterações no processo evolutivo. Já indivíduos mal avaliados possuem grande potencial de alterações. Dessa forma, esses indivíduos podem apresentar grandes saltos no processo evolutivo.

O algoritmo canônico funciona basicamente da seguinte maneira: i) sorteiam-se aleatoriamente todos os primeiros μ indivíduos do tipo $(\vec{x}, \vec{\sigma})$, sendo \vec{x} o vetor de variáveis objetivas e $\vec{\sigma}$ o vetor de estratégias de evolução, pertencentes à população inicial $P(t)$, para a geração $t = 0$; ii) avaliam-se todos os μ indivíduos da população inicial através da função de avaliação $f(\vec{x})$; iii) escolhem-se aleatoriamente 2 ou mais indivíduos pertencentes à população de genitores para a *Recombinação*, da qual resulta um indivíduo descendente. A este indivíduo é aplicado o processo de *Mutação*, geralmente uma alteração de pequena proporção às variáveis objetivas do indivíduo. Este procedimento, também conhecido por *Varição*, é repetido λ vezes para a geração t ; iv) avaliam-se todos os λ indivíduos resultantes do processo de *Varição*, pertencentes a uma nova população $P'(t)$, além dos m indivíduos da população inicial $P(t)$; v) selecionam-se os μ indivíduos melhores avaliados dentre a população de descendentes $P'(t)$ ou da união desta com a população de genitores $P(t)$; vi) incrementa-se a geração t e repete-se o processo a partir do passo iii caso nenhum critério de parada tenha sido satisfeito.

A estratégia evolutiva utilizada neste trabalho considera a união da população de descendentes com a população de genitores para a seleção dos melhores indivíduos no passo v.

A função de avaliação utilizada tem como objetivo relacionar da melhor forma possível os parâmetros do circuito elétrico que devem ser encontrados pela estratégia evolutiva com as características fornecidas pelo fabricante. Os termos escolhidos para fazer parte da função de avaliação estão relacionados diretamente com os parâmetros elétricos do circuito equivalente da Figura 2 a serem estimados. O torque é influenciado fortemente por R_1 , R_2 , X_1 , X_2 , X_M . A corrente, além de estar influenciada por todos os parâmetros mencionados anteriormente, também é fortemente influenciada por R_M . Faz parte também da função objetivo o Fator de Potência (FP), porque ele estabelece uma relação entre os parâmetros R e X do circuito elétrico equivalente. Já o rendimento é influenciado pela resistência de magnetização R_M .

A função de avaliação utilizada é apresentada pela equação (6). Basicamente, a função de avaliação representa a soma dos erros ao quadrado de cada dado calculado com relação do dado de placa.

$$\begin{aligned}
 f_{aval} = & [(T_{NomPlaca} - T_{NomCalc})^2 + \\
 & (T_{75Placa} - T_{75Calc})^2 + (T_{50Placa} - T_{50Calc})^2 \\
 & + (T_{PartidaPlaca} - T_{PartidaCalc})^2 + \\
 & (T_{maxPlaca} - T_{maxCalc})^2 + (I_{NomPlaca} - I_{NomCalc})^2 \text{ (6)} \\
 & + (I_{75Placa} - I_{75Calc})^2 + (I_{50Placa} - I_{50Calc})^2 \\
 & + (I_{PartidaPlaca} - I_{PartidaCalc})^2 +] / 9
 \end{aligned}$$

na qual:

$T_{NomPlaca}$:	Torque nominal ou a plena carga (placa);
$T_{NomCalc}$:	Torque nominal ou a plena carga (calculado);
$T_{75Placa}$:	Torque a 75% da carga (placa);
T_{75Calc} :	Torque a 75% da carga (calculado);
$T_{50Placa}$:	Torque a 50% da carga (placa);
T_{50Calc} :	Torque a 50% da carga (calculado);
$T_{PartidaPlaca}$:	Torque de partida (placa);
$T_{PartidaCalc}$:	Torque de partida (calculado);
$T_{maxPlaca}$:	Torque máximo (placa);
$T_{maxCalc}$:	Torque máximo (calculado);
$I_{NomPlaca}$:	Corrente nominal ou a plena carga (placa);
$I_{NomCalc}$:	Corrente nominal ou a plena carga (calculada);
$I_{75Placa}$:	Corrente a 75% da carga (placa);
I_{75Calc} :	Corrente a 75% da carga (calculada);
$I_{50Placa}$:	Corrente a 50% da carga (placa);
I_{50Calc} :	Corrente 50% da carga (calculada);
$I_{PartidaPlaca}$:	Corrente de partida (placa);
$I_{PartidaCalc}$:	Corrente de partida (calculada).

Os dados de placa são fornecidos pelo fabricante do motor. Já os dados calculados são obtidos a partir dos parâmetros do circuito elétrico equivalente e das equações associadas a ele.

É importante observar que os dados calculados não são aqueles que se deseja encontrar. Porém, eles irão permitir avaliar todos os indivíduos da população, os quais são caracterizados por seus genes (parâmetros do circuito elétrico equivalente).

RESULTADOS OBTIDOS

A estratégia evolutiva desenvolvida neste trabalho foi implementada em um software e aplicada a vários tipos de motores pertencentes a alguns tipos de fabricantes. Para efeito de comparação com outros métodos foram calculados os erros produzidos nas características calculadas a partir do circuito elétrico com relação aos dados de placa fornecidos pelos fabricantes. Basicamente, foram comparados os torques nominal, máximo e de partida e as correntes nominal e de partida obtidos a partir do circuito elétrico equivalente e suas equações com os dados de placa fornecidos pelos fabricantes [2].

O método desenvolvido apresenta grandes vantagens com relação a outros métodos. Geralmente, os métodos utilizados para obter os parâmetros do circuito elétrico não consideram a variação de parâmetros e produzem erros da ordem de 10% a 30%.

Com o método proposto neste trabalho, que utiliza a estratégia evolutiva combinada com o circuito elétrico equivalente com variação de parâmetros, foi possível obter erros inferiores a 1% na grande maioria dos casos. Em todos os casos, o erro máximo não ultrapassa 5%. Outra grande vantagem é o desempenho do método. Como a estratégia evolutiva consegue obter resultados satisfatórios com populações de menor tamanho e também com número menor de iterações, o resultado final é alcançado com maior rapidez quando comparado com outros

métodos.

A variação de parâmetros introduzida no circuito elétrico clássico de motor de indução foi fundamental na obtenção de resultados mais precisos. Durante o desenvolvimento do software a estratégia evolutiva foi utilizada combinada com o circuito elétrico clássico e foi observado que a curva característica resultante de torque em função do escorregamento para o motor não reproduzia adequadamente a curva característica fornecida pelo fabricante. Em alguns casos, a curva característica calculada a partir do circuito elétrico obtido pela estratégia evolutiva produzia erros baixos nas condições de operação próximas da região nominal (baixo escorregamento) e erros altos nas condições de operação próximas da região de partida (escorregamento alto). Em outros casos, os erros eram altos para a região nominal e baixos para a região de partida. Isso mostrou a importância de considerar os fenômenos físicos mencionados neste trabalho: o efeito pelicular e a saturação. Ao considerar esses fenômenos a partir de um circuito elétrico equivalente com variação de parâmetros, foi possível obter curvas características calculadas bastante próximas das curvas fornecidas pelos fabricantes.

A Figura 3 mostra uma tela do software desenvolvido que apresenta uma curva característica calculada a partir do circuito elétrico com variação de parâmetros obtido para um motor de indução de 93 kW pela estratégia evolutiva. Na Figura 4 é apresentada a curva característica desse mesmo motor fornecida pelo fabricante.

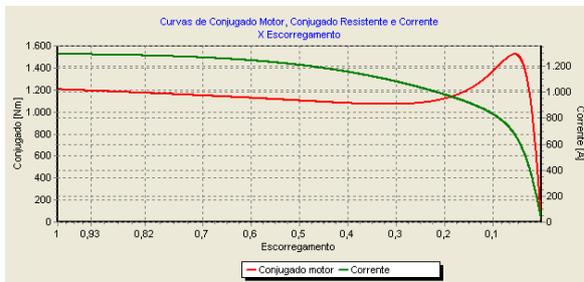


Figura 3 – Curva Característica Calculada de um Motor de 93 kW

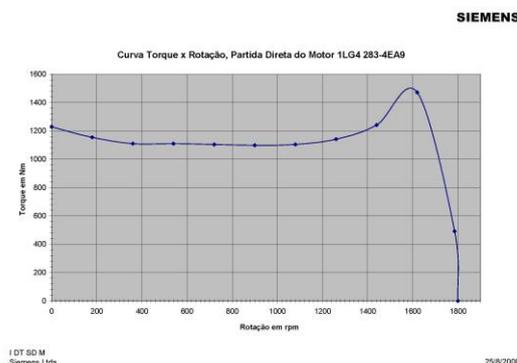


Figura 4 – Curva Característica Fornecida pelo Fabricante de um Motor de 93 kW

Como pode ser observado a curva calculada se aproxima bastante da curva fornecida pelo fabricante. Isso pode ser visto principalmente em dois pontos notáveis, como o torque de partida e o torque máximo. Além disso, nota-se que as duas curvas apresentam perfis semelhantes. Isso somente foi possível porque foi utilizado o circuito elétrico com variação de parâmetros.

CONCLUSÕES

Este trabalho apresentou um novo método para obter os parâmetros do circuito elétrico equivalente do motor de indução. Basicamente, foi utilizado um algoritmo evolutivo denominado estratégia evolutiva que foi combinada com o uso de um circuito elétrico com variação de parâmetros. Os resultados obtidos mostraram que o método apresentado produz curvas características de torque de baixo erro com relação às curvas fornecidas pelos fabricantes para os motores de indução.

O método desenvolvido foi implementado em um software e seus resultados permitiram o desenvolvimento de um software para análise de partida de motores e outras cargas perturbadoras [1].

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] T. P. L. Arango; A. Meffe; H. P. Schmidt; C. B. Donadel, 2009, “Impact Evaluation of Disturbing Loads on Secondary and Primary Distribution Networks”, CIRED 2009 – 20th International Conference on Electricity Distribution, Praga.
- [2] T. P. L. Arango, 2009, “Avaliação do Impacto de Motores de Indução Trifásicos em Redes de Distribuição de Energia Elétrica e uma Proposta de Regulamentação para seu Acesso às Redes de Baixa Tensão”, EPUSP, São Paulo, Brazil.
- [3] F. S. El Hage, 2004, “Desenvolvimento e Aplicação de um Algoritmo Evolutivo para a Otimização de Unidades de Geração Distribuída em Redes de Distribuição de Energia Elétrica”, EPUSP, São Paulo, Brazil.
- [4] S. J. Chapman, 2005, “Electric machinery fundamentals”, WCB/McGraw-Hill, Boston.
- [5] C. Goldemberg, 1992, “Determinação dos Parâmetros Funcionais de Motores de Indução a partir de Catálogos de Fabricantes”, Unicamp, Campinas, Brazil.