

Solução Embarcada Para Identificação De Falha De Curto-Circuito Em Estator De Máquinas De Indução Trifásicas

Embedded Solution For Three-Phase Induction Motors' Short Circuit Fault Identification

RESUMO

Erick Araujo Nunes
ericknunes@alunos.utfpr.edu.br
Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Cornélio Procopio, Paraná, Brasil

Victor Takeo Ferreira Takase
takase@alunos.utfpr.edu.br
Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Cornélio Procopio, Paraná, Brasil

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

Marcelo Favoretto Castoldi
marcastoldi@utfpr.edu.br
Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Cornélio Procopio, Paraná, Brasil

O presente trabalho consiste no desenvolvimento de um sistema embarcado aplicado ao diagnóstico de falhas de motores de indução trifásicos, utilizando um sistema de informação denominado informação mútua deslocada, em um *hardware* dedicado. Devido a abrangente aplicação deste tipo de equipamento nos mais diversos setores da indústria, buscaram-se alternativas para melhorar os processos produtivos. Uma dessas possibilidades consiste na diminuição da quantidade de paradas não programadas utilizando-se da análise da evolução de características associadas a falhas. Portanto o sistema embarcado tem por finalidade realizar a aquisição de dados de corrente elétrica provenientes do motor de indução trifásico, aplicando estes em uma função responsável por extrair o conjunto de dados de informação mútua deslocada. Por fim estes são submetidos a um classificador de padrões baseado em redes neurais artificiais, capaz de noticiar a ocorrência de falhas em um determinado intervalo de classificação.

PALAVRAS-CHAVE: Diagnóstico de Falhas. Motores de Indução Trifásicos. Sistemas Embarcados. Informação Mútua Deslocada. Redes Neurais Artificiais.

Recebido: 19 ago. 2019.

Aprovado: 01 out. 2019.

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



ABSTRACT

This work consists in the study of the fault diagnosis of three phase induction motors, using an information system called time-delayed mutual information, embedded in a dedicated hardware. Due to the wide application of this type of equipment in the most diverse sectors, alternatives are sought to optimize the productive processes, one of these possibilities is the reduction of the number of unscheduled stops, through the analysis of the evolution of characteristics associated with failures. Therefore, the embedded system has the purpose of performing the acquisition of electric current data from three-phase induction motor, applying them in a function responsible for extracting the set of the delayed mutual information data. Finally, they are submitted to a pattern classifier based in artificial neural network, capable to report the occurrence of failures in a given rating range.

KEYWORDS: Fault Diagnosis. Three Phase Induction Motors. Delayed Mutual Information. Embedded Systems. Artificial Neural Networks.

INTRODUÇÃO

A Agência Nacional de Energia Elétrica aponta o consumo de energia elétrica como um dos principais indicadores de desenvolvimento econômico de uma nação. No Brasil, houve um crescimento acentuado na demanda por energia elétrica nos últimos 20 anos, refletindo diretamente no ritmo de atividade de diversos setores.

Além disso, de acordo com dados da Empresa De Pesquisa Energética (2018), o consumo de energia elétrica do setor industrial alcança 36% do uso deste tipo de energia no Brasil, dos quais aproximadamente 55% correspondem ao emprego de motores elétricos.

O motor de indução trifásico consiste no principal elemento de conversão de energia elétrica em mecânica, amplamente consolidado por suas características de baixo custo e robustez. Apesar de possuir os atributos citados, o MIT, como todo equipamento eletromecânico, sofre desgastes nas partes que o compõem (GUEDES et al., 2018).

A ocorrência de falhas nestes equipamentos se deve às condições de operação, instalação, alimentação, dentre outros fatores (BAZAN et al., 2019). Estas podem ser de natureza elétrica ou mecânica, possibilitando a perda de desempenho da máquina de indução ainda em seus estágios iniciais (GUEDES et al., 2018).

Consistindo em sistemas elétricos com elevada simetria quando saudáveis, a ocorrência de falhas em motores de indução trifásicos acarreta alterações nos sinais de corrente elétrica, pois afetam diretamente parâmetros elétricos deste tipo de máquina (GONGORA et al., 2016).

Desta maneira, é possível utilizar-se de sistemas de informação com a finalidade de realizar a extração de características com base nos sinais de corrente elétrica. O diagnóstico da falha de curto-circuito entre espiras nos enrolamentos presentes no estator de motores de indução trifásicos é realizado mediante a utilização de um classificador de padrões baseado em redes neurais artificiais.

MATERIAL E MÉTODOS

O conceito de informação mútua foi introduzido por Shannon e Weaver no ano de 1948, com o avanço destes estudos, criou-se o *bit* como unidade de medida de informação.

A Informação Mútua consiste em uma medida da quantidade de informação relacionada à incerteza entre emissor e receptor, determinada com base nas funções densidade de probabilidade marginais de variáveis aleatórias X , Y e sua probabilidade conjunta, definidas respectivamente como $p_X(x)$, $p_Y(y)$ e $p(x, y)$. Desta forma, a informação mútua pode ser determinada conforme a Eq. (1) (BAZAN et al., 2019).

$$I(X, Y) = \sum_{x \in X} \sum_{y \in Y} p(x, y) \log_2 \frac{p(x, y)}{p_X(x)p_Y(y)} \quad (1)$$

De acordo com Bazan et al. (2019) a informação mútua é utilizada como uma ferramenta de medida de similaridade entre séries temporais simultaneamente coletadas. Por este motivo é possível verificar as condições de operações de máquinas elétricas.

Para a estratégia embarcada em *hardware* desenvolvida, utiliza-se um deslocamento de 150 pontos de amostras, originando uma característica de informação mútua sensível às anomalias que se manifestam em sinais de corrente elétrica para duas fases da máquina.

Com a finalidade de identificar a ocorrência da falha de curto-circuito em estator de motores de indução trifásicos, é utilizado um classificador de padrões baseado em redes neurais artificiais, capaz de distinguir uma máquina saudável de um motor elétrico sujeito à falha de curto-circuito entre espiras dos enrolamentos do estator, mediante a criação de *clusters* durante o processo de treinamento da rede neural.

Com a finalidade de realizar o treinamento da rede neural artificial do tipo *Perceptron* de múltiplas camadas, utiliza-se o algoritmo *backpropagation*, que pode ser dividido em duas etapas principais. A primeira, denominada *forward*, consiste na propagação dos dados de entrada pela rede neural, de forma que os valores de saída desejados são conhecidos. A partir de valores de erros obtidos nas saídas, a segunda etapa, denominada *backward*, desempenha o ajuste do conjunto de pesos sinápticos, mediante a minimização da soma dos erros produzidos (SILVA; SPATTI; FLAUZINO, 2016).

Por tratar-se da proposta deste trabalho o desenvolvimento de um sistema embarcado capaz de realizar as etapas de extração de características e classificação de padrões, é empregado um processador digital de sinais TMS320F28335. Este *hardware* apresenta em suas características a capacidade de realizar a aquisição de dados de corrente elétrica e tratamento destes.

Posterior à etapa de amostragem, são determinadas as funções densidade de probabilidade (PDF), do inglês *Probability Density Function*, dos sinais, mediante a disposição em histogramas dos dados amostrados, descartando a necessidade de aplicar funções específicas capazes de representar as distribuições de probabilidades (BAZAN et al., 2019).

Por fim, determina-se a informação mútua e, ao passo que as amostras de corrente elétrica da fase A são mantidas estacionárias, aplica-se um deslocamento nas amostras de corrente da fase B, até que o atraso seja de 150 amostras. O algoritmo desenvolvido realiza as instruções conforme o pseudocódigo que segue:

Início {Algoritmo Informação Mútua}

- < 1 > Declarar as variáveis
- < 2 > Obter os dados de corrente elétrica das fases A e B simultaneamente
 - < 3 > Preencher o histograma para a corrente elétrica da fase A
 - < 4 > Repetir as instruções
 - < 4.1 > Preencher o histograma para a corrente elétrica da fase B
 - < 4.2 > Preencher o histograma conjunto para ambas correntes
 - < 4.3 > Determinar a PDF para a fase A
 - < 4.4 > Determinar a PDF para a fase B
 - < 4.5 > Determinar a PDF conjunta
 - < 4.6 > Determinar a Informação Mútua
 - < 4.7 > Deslocar em uma amostra os dados da corrente da fase B
- Até que o deslocamento seja de 150 amostras

Fim {Algoritmo Informação Mútua}

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Após o treinamento da rede neural para a identificação de falhas de curto-circuito em estator, são extraídos novos conjuntos de dados de corrente elétrica com a finalidade de validar o sistema embarcado proposto, estes são fornecidos à ferramenta de extração de características baseada na informação mútua atrasada.

Para a realização dos ensaios, os vetores de corrente elétrica são preenchidos com 2000 pontos para a fase A e 2150 para a fase B, em 10 ensaios para motores de indução trifásicos com as características dispostas conforme a Tabela 1.

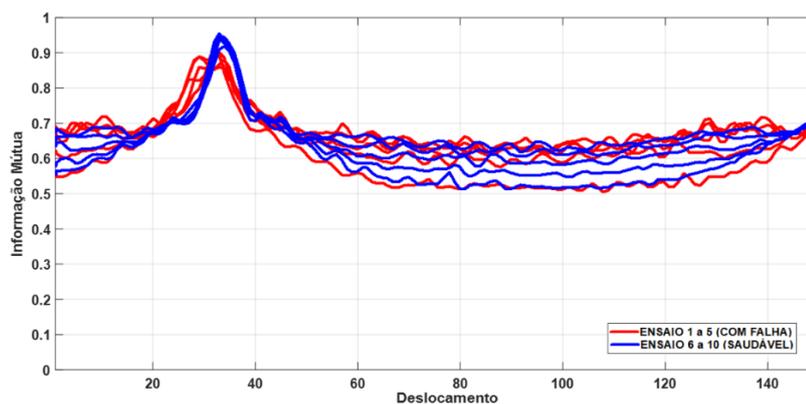
Tabela 1 – Dados dos motores utilizados para treinamento e validação.

Parâmetro	Informações
Fabricante	WEG
Modelo	Alto Rendimento
Potência	1 CV
Tensão de Alimentação (Δ/Y)	220/380 Volts
Corrente de Alimentação (Δ/Y)	3,02/1,75 Ampères
Número de fases	3
Frequência	60
Número de Polos	4
Velocidade de Rotação Nominal	1730 rpm
Torque Nominal	4,1 N.m

Fonte: Autoria própria (2019).

Conforme citado, a característica de informação mútua é sensível à ocorrência de falhas, esta sensibilidade é apresentada conforme a Figura 1, que ilustra a realização de dez ensaios em motores saudáveis e máquinas submetidas a falhas de curto-circuito em estator para diferentes valores de conjugado de carga.

Figura 1 – Característica de informação mútua atrasada para os ensaios realizados.



Fonte: Autoria Própria (2019).

Desta maneira, o classificador de padrões baseado em redes neurais artificiais do tipo *Perceptron* multicamadas é capaz de indicar a ocorrência de falhas mediante a formação de *clusters* durante o processo de treinamento. Assim, para a etapa de validação o classificador de padrões deve apontar “0” para máquinas que apresentam a ocorrência de falha e “1” para os motores saudáveis. Os resultados obtidos são representados conforme a Tabela 2.

Tabela 2 – Experimentos realizados

Ensaio	Resultado
Motor 1 (Com falha)	0
Motor 2 (Com falha)	0
Motor 3 (Com falha)	0
Motor 4 (Com falha)	0
Motor 5 (Com falha)	0
Motor 6 (Saudável)	1
Motor 7 (Saudável)	1
Motor 8 (Saudável)	1
Motor 9 (Saudável)	1
Motor 10 (Saudável)	1

Fonte: Autoria própria (2019).

Dentre as amostras fornecidas para a validação do sistema, 100% foram classificadas corretamente.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

A metodologia utilizada para comprovar o desempenho do sistema proposto foi eficaz em validar a capacidade de processamento e funcionalidade da estratégia embarcada mesmo quando esta possui uma menor quantidade de amostras.

Faz-se necessário explicitar que sistemas embarcados possuem uma quantidade de memória de dados inferior a computadores mais robustos, justificando a necessidade de analisar a performance da estratégia com um menor volume de dados, conforme realizado no decorrer da metodologia proposta.

Por fim, conclui-se que a implementação em processador digital de sinais de um algoritmo de informação mútua atrasada consiste em uma eficiente estratégia para diagnóstico de falhas de curto-circuito em estator de motores de indução trifásicos.

AGRADECIMENTOS

O presente trabalho foi realizado com apoio do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico CNPq - Brasil (Processos Nº 474290/2008-5, 473576/2011-2, 552269/2011-5, 201902/2015-0) e Fundação Araucária de Apoio ao Desenvolvimento Científico e Tecnológico do Paraná (Processo Nº338/2012).

REFERÊNCIAS

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Atlas de Energia Elétrica do Brasil**. Disponível em: <<http://www.aneel.gov.br>>. Acesso em: 14 mai. 2019.

BAZAN, G. H.; SCALASSARA, P. R.; ENDO, W.; GOEDEL, A. PALÁCIOS, R. H. C.; GODOY, W. F. Stator Short-Circuit Diagnosis in Induction Motors Using Mutual Information and Intelligent Systems. **IEEE Transactions on industrial electronics**, v. 66, p. 3237-3246, 2019. ISSN 1557-9948.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Matriz Energética e Elétrica**. Disponível em: <<http://epe.gov.br>>. Acesso em: 14 mai. 2019.

GONGORA, W. S.; GOEDEL, A.; SILVA, S. A. O.; GRACIOLA, C. L.; Neural Approach to Fault Detection in Three-phase Induction Motors. **IEEE Latin America Transactions**, v. 14, n. 3, p. 1279-1288, 2016. ISSN 1548-0992.

GUEDES, J. J.; CASTOLDI, M. F.; GOEDEL, A.; AGULHARI, C. M.; SANCHES, D. S. Differential evolution applied to line-connected induction motors stator fault identification. **Soft Computing**, 2018. DOI: 10.1007/s00500-018-3674-z.

SILVA, I. N.; SPATTI, D. H.; FLAUSINO, R. A. **Redes Neurais Artificiais para engenharia e ciências aplicadas: Fundamentos teóricos e aspectos práticos**. São Paulo, 2015.