

Análise de chaves comutadoras utilizando Redes de Bragg e Support Vector Machine

Analysis of tapping switches using Fiber Bragg Gratings and Support Vector Machine

RESUMO

O sensoriamento e análise em tempo real de equipamentos elétricos baseados em chaves comutadoras são importantes para o ambiente da engenharia elétrica, atuando como proteção para muitos sistemas complexos, ou em outras áreas, como na rede de distribuição de energia. Este trabalho tem como objetivo apresentar um estudo de um sistema simples e versátil para a detecção de falhas nesses equipamentos, com base na análise de dados via *Support Vector Machine* (SVM) e utilização das Redes de Bragg em fibra óptica (FBG) como sensor. O equipamento de comutação elétrico escolhido para testes foi um relé elétrico genérico de 12 V, nele foi simulado a obstrução de contatos e a degradação gradual da mola de retorno. Com os sinais capturados por apenas um elemento sensor FBG, foi possível extrair suas principais características e criar um gráfico de dispersão por onde aplicou-se quatro funções simples de Kernel no SVM. Pelos resultados observados na tabela de erro de classificação, observou-se que a FBG é um sensor adequado para detectar as variações do sinal e o SVM um método computacionalmente leve e eficiente para se adquirir os padrões de cada condição de falha.

PALAVRAS-CHAVE: Circuitos de comutação. Sistemas de reconhecimento de padrões. Redes de Bragg em fibra óptica.

ABSTRACT

Real-time sensing and analysis of electrical equipment based on tapping switches are important for the electrical engineering environment, acting as protection for many complex systems or other areas, such as power distribution network. This work aims to present a study of a simple and versatile system for the detection of failures on such equipment, based on Support Vector Machine (SVM) data analysis and Fiber Bragg Gratings (FBG) usage as the sensor. The electrical switching equipment chosen for testing was a generic 12 V electrical relay, in which contact obstruction and gradual degradation of the return spring were simulated. With signals captured by only one FBG sensor element, it was possible to extract its main characteristics and create a scatter plot through which four simple Kernel functions were applied to the SVM. From the observed results in the classification error table, it was found that the FBG is an adequate sensor to detect signal variations and the SVM is a computationally light and efficient method to acquire the patterns of each failure condition.

KEYWORDS: Switching circuits. Pattern recognition systems. Fiber Bragg Gratings.

Eduardo Henrique Dureck
ehdureck@gmail.com
Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, Paraná, Brasil

Jean Carlos Cardozo da Silva
jeanccs@utfpr.edu.br
Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, Paraná, Brasil

Uilian José Dreyer
uiliandreyer@utfpr.edu.br
Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, Paraná, Brasil

Recebido: 19 ago. 2020.

Aprovado: 01 out. 2020.

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



INTRODUÇÃO

Os dispositivos de comutação são partes importantes do ambiente da engenharia elétrica, atuando como proteção para muitos sistemas complexos, como relés de segurança e *Circuit Breakers* (CBs), ou em outras áreas, tais como Comutadores de Derivação em Carga (CDC ou OLTC) de transformadores. Os dispositivos elétricos comutadores são capazes de realizar um número limitado de operações antes de começar a apresentar problemas. Já é de consenso a troca das molas de alguns sistemas, devido ao seu desgaste, entretanto defeitos como desalinhamento ou deterioração de contatos também são comuns (ZAIDEY, 2017; JING, 1992). Estas falhas podem ser catastróficas para mecanismos de chaveamento em sistemas complexos se não forem devidamente monitoradas, levando a incontáveis prejuízos.

Para tanto, já existe o emprego de sensores para detecção em tempo real da qualidade de chaveamento, facilitando a prevenção de falhas catastróficas. Alguns dos mais convencionais são os sensores acústicos e acelerômetros. Estes se baseiam na detecção de vibrações e na análise da frequência característica das condições de comutação (CICHÓN, *et al*, 2012; DUAN, 2016). Todavia, por fazerem a medição indireta e não invasiva, eles não têm a facilidade de detectar os padrões individuais dos contatos em dispositivos com múltiplas chaves comutadoras (RIVAS, 2009). Além disso, tem-se o problema da versatilidade dos sensores e métodos de estudo dos dados.

O propósito deste trabalho é apresentar um estudo de um sistema simples e versátil capaz de detectar diferenças na comutação de chaves de equipamentos. Com o intuito de resolver os problemas citados anteriormente, os sensores ópticos se provaram eficientes. A Rede de Bragg em fibra óptica (FBG), em especial, pode ser utilizada em diferentes áreas da engenharia, pois é um sensor de tamanho reduzido, com bom tempo de resposta, pouca perda de sinal, imune à interferência eletromagnética e eletricamente passivo (RAZALI, *et al*, 2014). Portanto, foi aderido seu uso pela capacidade de utilização direta em contatos de dispositivos eletromagnéticos de difícil acesso.

Neste trabalho, será discutida a utilização da FBG como sensor para detecção de diferentes condições de acoplamento de contatos impostas a um relé Meishuo Eletric 12V MPL-112-A genérico com vida útil mínima de 1 milhão de ciclos operacionais, assim como sua ampliação para outros equipamentos. As análises se deram sem interferência proveniente de ruídos externos e com monitoramento feito em tempo real. Para avaliar os dados do relé adquiridos e classificar os diferentes padrões, foram processados os resultados buscando as características mais significativas, que são o tempo e a Densidade Espectral de Potência (PSD). Utilizou-se quatro equações de *Support Vector Machine* (SVM) para classificações binárias, cada um com um índice de classificação incorreta diferente, mas todos capazes de diferenciar as condições aplicadas ao experimento.

MATERIAIS E MÉTODOS

A FBG é uma modulação periódica do índice de refração do núcleo da fibra óptica que reflete uma parte do espectro da luz incidente. Essa reflexão do comprimento de onda é denominada comprimento de onda de Bragg e sua

amplitude é suscetível a deformações e mudanças de temperatura (OTHONOS, 1999; KASHYAP, 1999). De acordo com a lei de Bragg, essa reflexão pode ser representada por (1).

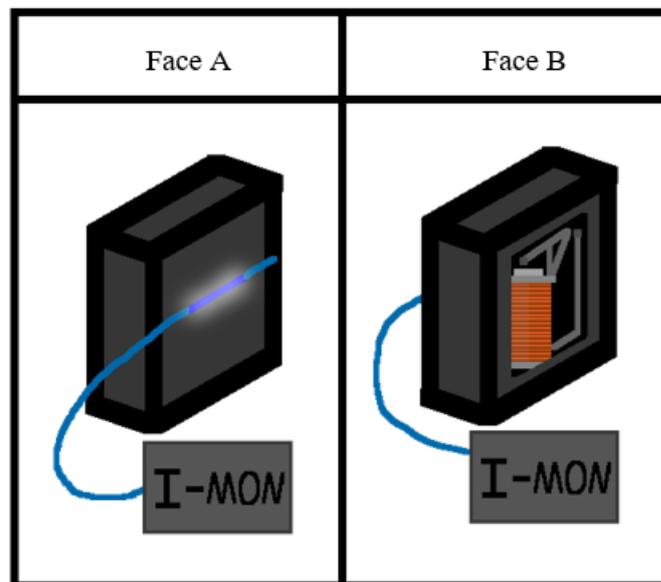
$$\lambda_B = 2\Lambda n_{eff} \quad (1)$$

onde n_{eff} é o índice efetivo de refração do modo fundamental da fibra e Λ é o período da modulação de refração da FBG (OTHONOS, 1999).

A FBG selecionada foi produzida com o método da máscara de fase (KASHYAP, 1999). A fibra óptica selecionada foi do tipo Thorlabs GF1 e o comprimento de onda de Bragg escolhido foi de 1532 nm, com índice de refletividade de aproximadamente 90 % e largura de banda de 0,4 nm.

Para o experimento, a FBG foi colada a um lado do relé encapsulado (face A), o outro lado está aberto para testes adicionais (face B), como pode-se observar na Figura 1. A quantidade de cola utilizada foi mínima, para não avariar a captura da vibração do relé durante a comutação. A fibra óptica foi conectada a um interrogador I-MON 512 de alta velocidade com 6 kHz de taxa de aquisição, como leitor dos dados do ensaio.

Figura 1 – Ilustração das faces do mesmo relé, sendo Face A onde a FBG está colada e a Face B onde existe uma abertura para testes invasivos. A fibra está conectada ao interrogador I-MON.



Fonte: Autoria própria (2020).

O experimento consistiu em simular o desgaste da mola e a obstrução do contato de uma chave comutadora, que são falhas comuns já comentadas anteriormente. Para simular o desgaste na mola mais facilmente, teve-se como base que o sistema eletrodinâmico de comutação de um relé é semelhante ao de uma contatora e que a força no chaveamento dela está representada em (2).

$$F = - \frac{dW_{mag}}{dx} - F_{spring} \quad (2)$$

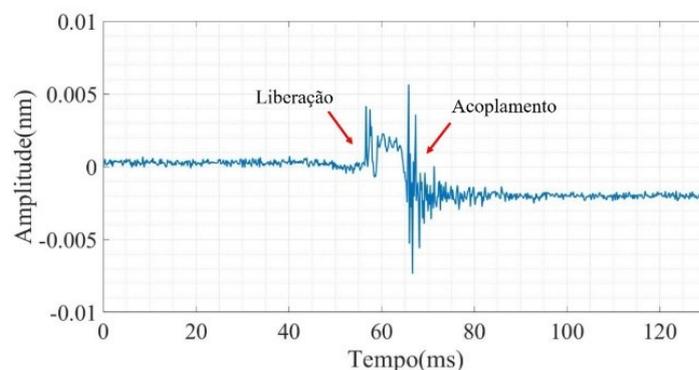
onde W_{mag} é a expressão da energia magnética que depende das indutâncias do circuito magnético e das correntes elétricas presentes no mesmo, x é o deslocamento do contato móvel e F_{spring} é a força da mola de retorno. Sabe-se, também, que a força da mola depende de sua deformação e a constante elástica (RIBA, 2010).

Tendo isso em mente, é possível observar que a força produzida no retorno da mola é oposta a força magnética do fechamento dos contatos (RIBA, *et al*, 2008). Ou seja, variação na corrente simula possíveis alterações na constante elástica da mola, e para fazer essa variação, resistores em série com a bobina podem ser utilizados.

Foram adquiridas 10 amostras do relé conectado diretamente à fonte, com 47Ω entre elas, depois 94Ω , 110Ω , 137Ω . Também foram adquiridas mais 5 amostras com 157Ω e mais 5 sem nenhuma resistência acoplada e com um pedaço de papel de espessura de cerca de $0,1 \text{ mm}$ obstruindo o contato.

Após a aquisição dos dados foi necessário conhecer as características que melhor diferenciem os grupos de sinais. Para o ensaio em questão, uma das mais notáveis foi o tempo de evento. À medida que se aumenta a resistência, o tempo de transição dos contatos de aberto para fechado é aumentado. É possível observar isso pela vibração captada pela variação do comprimento de onda da FBG, como se pode observar na Figura 2.

Figura 2 – Amostra da FBG da comutação do relé com uma resistência de 94Ω em série. É possível observar, pelos picos de vibração, o tempo de transição da comutação.



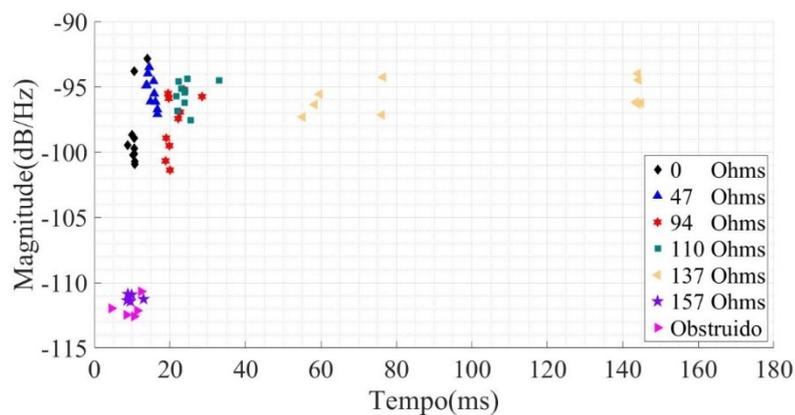
Fonte: Autoria própria (2020).

Enquanto isso, foi possível notar que o tempo médio para a resistência de 157Ω é semelhante para a resistência de 0Ω . Devido a esta peculiaridade, é necessário adotar outra característica que possa diferenciar tais condições. Uma opção foi analisar as frequências geradas durante o evento, que é um método comumente utilizado. Para isso, foi proposta a utilização do PSD, que mede a potência do sinal versus a frequência. O software escolhido para as avaliações numéricas foi o MATLAB.

Tendo essas duas características é possível distinguir o alto valor da resistência, assim como o contato obstruído, onde ambos têm PSD médio semelhante ao ruído da FBG, como pode-se observar na Figura 3. Vale a pena notar

que a resistência de 157Ω é semelhante ao contato obstruído, pois ambos não chegam a acoplar devidamente o contato. E, também, que a resistência de 137Ω não é consistente no tempo, pois a força magnética está no limiar da força da mola. Esse fator faz com que qualquer pequena variação de inclinação do relé ou resistência elétrica, altere consideravelmente o tempo que o contato demora para ganhar momento em relação ao eletroímã (JIAXIN, *et al*, 2015).

Figura 3 – Diagrama de dispersão do tempo de evento e a média do PSD conforme a resistência.



Fonte: Autoria própria (2020).

No entanto, é possível criar um sistema de computação em que seja possível separar os dados automaticamente e classificá-los, usando a máquina de vetor de suporte (SVM). Ela funciona criando um hiperplano que melhor separa os dados, chamado de limite de divisão, conforme uma função previamente definida. Essas funções previamente definidas são as funções de Kernel (THEODORIDIS, 2003). Para melhor saber qual modelo de função utilizar, será aplicada 4 funções simples para otimizar computacionalmente o sistema.

As funções de Kernel testadas foram linear (3), gaussiana (4), polinomial (5) e sigmoide (6). As fórmulas são apresentadas abaixo, respectivamente.

$$K(u, v) = u^t v \quad (3)$$

$$K(u, v) = \exp(-\|u - v\|^2) \quad (4)$$

$$K(u, v) = (1 + u^t v)^q \quad (5)$$

$$K(u, v) = g u^t v + c \quad (6)$$

onde c e g são constantes que são definidas para melhor ajustar o hiperplano, q é a ordem do grau do polinômio e t significa vetor transposto.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Após aplicar as diferentes funções de Kernel, foi utilizada a função Crossval, incluída na biblioteca do MATLAB. Essa função permite separar os dados aleatoriamente em 10 conjuntos de mesma dimensão e treinar um SVM para 9 dessas classes. Este processo é repetido 10 vezes com combinações aleatórias. Depois, pode-se utilizar a função kfoldloss, também incluída na biblioteca do

MATLAB, que retorna uma perda genérica de validação cruzada, essa perda é uma estimativa do erro de classificação do SVM selecionado e é baseada nos dados de entrada.

A tabela 1 foi criada para avaliar a melhor função de Kernel a ser aplicada no experimento, com pequenas alterações nas constantes e usando apenas os grupos de dados mais próximos. A ordem polinomial do kernel escolhida foi 3.

Quadro 1 – Erro de classificação dentre as classes e SVMs

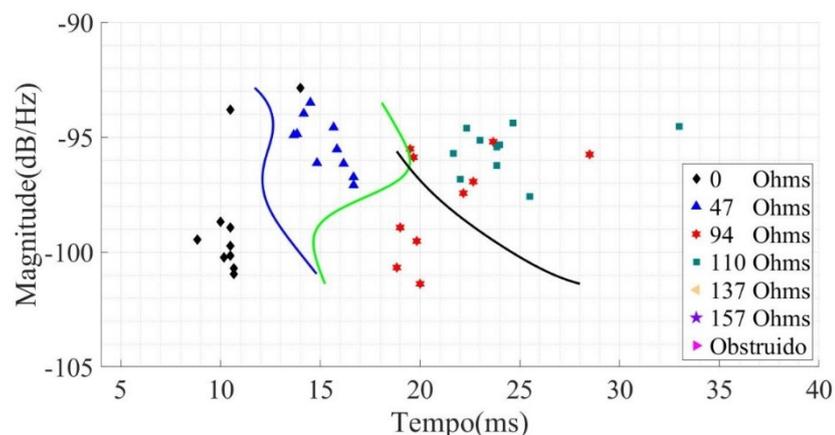
H x M (%)	L	G	P	S
0/47	5%	10%	5%	5%
47/94	0%	0%	0%	0%
94/110	30%	40%	30%	35%
157/OB	20%	20%	30%	30%

Fonte: Autoria própria (2020).

H é o hiperplano entre 2 grupos diferentes, M é a probabilidade de erros de classificação em porcentagem com base nos dados de entrada, L é o Kernel Linear, G o Kernel Gaussiano, P o Kernel Polinomial de terceira ordem e S o Kernel Sigmoide. OB são os dados de contato obstruídos.

Como pode-se observar, todos os métodos podem separar os dados e, apesar da dificuldade em ver uma função linear dividindo os grupos, ela foi a mais adequada para o experimento, simplificando e aumentando a velocidade da avaliação numérica. Também é perceptível a alta classificação incorreta entre 94 Ω e 110 Ω, isso é causado pelo passo entre as resistências ser muito pequeno para avaliar e distinguir com funções mais simples. Na Figura 4, segue uma imagem da divisão de alguns dados utilizando o Kernel sigmoide.

Figura 4 – Conjunto de amostras divididas conforme o SVM utilizando o Kernel sigmoide.



Fonte: Autoria própria (2020).

Com o cálculo da média dos dados é possível observar uma taxa de erro de classificação médio de 16,25 %. Considerando a condição da divisória entre 94 Ω e 110 Ω e excluindo ela, pois o sistema não tem resolução para resolver o problema, o erro médio diminui para 10,42 %, sendo que o Kernel linear tem um erro de

apenas 8,33 %. Portanto, tem-se a preferência por criar padrões de condição do equipamento de maior passo afim de atender as necessidades do equipamento e diminuir problemas numéricos. Caso os padrões ainda se mesquem, é necessário otimizar as funções de Kernel para melhores resultados, o que poderia tornar o sistema menos competitivo computacionalmente.

CONCLUSÃO

Foi possível verificar a eficácia do SVM para a separação dos padrões de comutação do relé, utilizando funções de Kernel relativamente simples. Obteve-se uma taxa de probabilidade de erro de classificação, no geral, baixa. Em termos computacionais, esse método é considerado mais avançado que outros convencionais como o K-vizinhos mais próximos (KNN) e é menos intensivo computacionalmente em comparação com a Rede Neural Artificial (ANN), todavia o passo entre os padrões deve estar dentro das condições que o sistema atende. Além disso, com a praticidade da utilização da FBG, esse estudo inicial tem viabilidade para ser aplicado em outros sistemas de comutação, dentre eles a contatora. Sendo que a principal vantagem do método empregado, é a medição direta sem fontes cruzadas, assim será possível avaliar antecipadamente os defeitos e comparar com métodos já existentes.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao CNPq, à CAPES, à FINEP e a Fundação Araucária pela concessão da bolsa e apoio financeiro ao laboratório.

REFERÊNCIAS

CICHOÑ, A.; BOCZAR, T.; FRĄCZ, P.; ZMARZŁY, D. Detection of defects in on-load tap-changers using acoustic emission method. *In: 2012 IEEE INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON ELECTRICAL INSULATION, 2012, San Juan. Anais do IEEE International Symposium on Electrical Insulation*. San Juan: 2012.

DUAN, R.; WANG F. Fault diagnosis of on-load tap-changer in converter transformer based on time–frequency vibration analysis. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, v. 63, n. 6, p. 3815–3823, fev. 2016.

JIAXIN Y.; HUIMIN, L.; GUANGCHENG, M.; SHUQING, C.; ZHAOWEN, C. Research on the dynamic calculation model for a dc solenoid electromagnetic contactor and its contact characteristics in break process. *In: 2015 IEEE 61ST HOLM CONFERENCE ON ELECTRICAL CONTACTS (HOLM), 2015, San Diego. Anais do IEEE 61st Holm Conference on Electrical Contacts (Holm)*. San Diego: 2015.

JING, L.; GUANSHENG, Z. An experimental investigation of the dynamic contact characteristics on the relay contacts. *In: Electrical Contacts - 1992 Proceedings of the Thirty-Eighth IEEE HOLM CONFERENCE ON ELECTRICAL CONTACTS, 1992, Philadelphia. Anais do IEEE HOLM Conference on Electrical Contacts*. Philadelphia: 1992.

KASHYAP, R. **Fiber Bragg grating**. 1. ed. San Diego: Academic Press, 1999.

OTHONOS, A.; KALLI, K. **Fiber Bragg grating: fundamentals and applications**. 1. ed. London: Artech House, 1999.

RAZALI, N.; Et al. Temperature sensitivity comparison between bare FBG and buffered FBG. *In*: 2014 IEEE 5TH INTERNATIONAL CONFERENCE ON PHOTONICS (ICP), 2014, Kuala Lumpur. **Anais do IEEE 5th International Conference on Photonics (ICP)**. Kuala Lumpur: 2014.

RIBA, J. R.; ESPINOSA, A. G.; CUSIDO, J; ORTEGA, J. A. A design of shading coils for minimizing the contact bouncing of AC contactors. *In*: 2008 Proceedings of the 54th IEEE HOLM CONFERENCE ON ELECTRICAL CONTACTS, 2008, Orlando. **Anais do IEEE Holm Conference on Electrical Contacts**. Orlando: 2008.

RIBA, J. R.; ESPINOSA, A. G.; ROMERAL, L. A computer model for teaching the dynamic behavior of AC contactors. **IEEE Transactions on Education**, v. 53, n. 2, p. 248–256, mai. 2010.

RIVAS, E.; BURGOS, J.; GRACIA-PRADA, J. Condition assessment of power OLTC by vibration analysis using wavelet transform. **IEEE Transactions on Power Delivery**, v. 24, n. 2, p. 687–694, mar. 2009.

SOUSA, K.; HAFNER, A.; KALINOWSKI, H.; SILVA, J. Determination of temperature dynamics and mechanical and stator losses relationships in a three-phase induction motor using fiber Bragg grating sensors. **IEEE Sensors Journal**, v. 12, n. 10, p. 3054–3061, jul. 2012.

THEODORIDIS, S.; KOUTROUMBAS, K. **Pattern recognition**. 2. ed. San Diego: Academic Press, 2003.

ZAIDEY, Y.; GHAZALI, Y. Managing on-load tap changer life cycle in Tenaga Nasional Berhad (TNB) distribution power transformers. **CIREN – Open Access Proceedings Journal**, v. 2017, n. 1, p. 303–307, out. 2017.