

DESENVOLVIMENTO EM PLATAFORMA FPGA DE SISTEMA DE DETECÇÃO PRECOCE DE FALHAS EM ISOLAMENTO DE MÁQUINAS ELÉTRICAS

Bruno Renó Gama (UNIFEI) Email: brrgama@gmail.com
Wilson Cesar Sant'Ana (Instituto Gnarus) Email: wilson@institutognarus.com.br
Luiz Eduardo Borges da Silva (UNIFEI) Email: leborges@unifei.edu.br
Camila Paes Salomon (UNIFEI) Email: camilapsalomon@gmail.com
Carlos Eduardo Teixeira (UNIFEI) Email: carlos.teixeira@unifei.edu.br
Mateus Mendes Campos (UNIFEI) Email: m.campos.mateus@gmail.com
Germano Lambert Torres (Instituto Gnarus) Email: germanoltorres@gmail.com
Erik Leandro Bonaldi (Instituto Gnarus) Email: erik@institutognarus.com.br
Rafael Bartholomeu Bernardo Carvalho (EDF Norte Fluminense) Email: rafael.carvalho@edfnf.com.br

Resumo: Este artigo apresenta o desenvolvimento de um sistema embarcado, composto por *hardware* e *software*, utilizando uma plataforma FPGA, para a detecção precoce de danos no isolamento de máquinas elétricas. É utilizada a técnica de análise por resposta em frequência na previsão das falhas. O sistema desenvolvido é responsável por gerar e injetar sinais de uma determinada faixa de frequência na máquina sob teste. Para cada frequência gerada, é medido o valor de impedância da máquina. Ao final do processo, é obtido o espectro de impedâncias da máquina. Os espectros obtidos são comparados com um espectro de referência, chamado de *baseline*. Variações entre os espectros obtidos e o *baseline* podem indicar diversos tipos de falhas no isolamento da máquina. É utilizada uma técnica estatística para uma análise objetiva das variações entre os espectros obtidos e o *baseline*. O sistema foi desenvolvido utilizando uma plataforma ainda nova no mercado, denominada STEMLab, da empresa Red Pitaya. Ela possui um dispositivo SoC Zynq-7000 acoplado à placa, esse dispositivo integra um FPGA e um processador ARM. O *hardware* embarcado executa um servidor TCP/IP. Este servidor atende requisições de máquinas remotas na rede. Foi implementado um *software* de análise, para os clientes remotos, utilizando C#. Resultados experimentais são apresentados em uma máquina síncrona com taps no enrolamento do estator.

Palavras-chave: Espectro de impedâncias, manutenção preditiva, análise por resposta em frequência, FPGA.

DEVELOPMENT IN FPGA PLATFORM OF A SYSTEM FOR DETECTION OF EARLY DAMAGE TO INSULATION OF ELECTRICAL MACHINES

Abstract: This article presents an embedded system development, composed by hardware and software, using an FPGA platform, for detection of early damage to insulation of electric machines. The frequency response analysis technique is used for fault detection. The developed system is responsible for generation and injection of signals in a determined frequency range into the machine under test. For each generated frequency, the machine impedance is measured. At the end of the process, the machine impedance spectrum is obtained. All obtained spectra are compared with a reference spectrum, called baseline. Variations between obtained spectrum and baseline can quantify the damage in machine insulation. A statistical technique is used for an objective analysis of variations between the obtained spectrum and the baseline. The system was developed using a still new platform in the market, called STEMLab, from Red Pitaya enterprise. It has a SoC Zynq-7000 device embedded in board, this device integrates and FPGA and an ARM processor. The embedded hardware runs a TCP/IP server. This server responds to request from remote clients on the network. It has been developed an analysis software, for the remote clients, using C# language. Experimental results are presented using a synchronous machine with taps on its stator winding.

Keywords: Impedance spectrum, predictive maintenance, frequency response analysis, FPGA.

1. Introdução

Uma grande parcela das falhas ocorridas em máquinas elétricas são ocasionadas por

danos no isolamento. Sumereder (2008) e Brutsch *et al.* (2008) apontam uma pesquisa internacional realizada pelo CIGRE. Essa pesquisa foi feita em mais de 20 concessionárias em 5 países. Ao final da pesquisa, foram analisados um total de 1199 geradores elétricos. Durante os 10 anos de pesquisa e coleta de dados, foram constatados 69 falhas. Verificou-se que, a maior parte das falhas ocorridas (56%) foram geradas por danos no isolamento da máquina. Segundo Drif & Cardoso(2014), para o mesmo tipo de falha, porém agora para motores de indução, a porcentagem fica em torno de 26% e 36%. Os dados apontam para a importância que deve ser dada às falhas geradas por danos no isolamento, justificando assim o estudo e implementação de técnicas que possam realizar o diagnóstico correto desses tipos de falhas.

Existem várias técnicas encontradas na literatura para realizar o diagnóstico de falhas no isolamento de máquinas elétricas. Algumas das técnicas encontradas são: medição da resistência ôhmica dos enrolamentos (KLEMPNER & KERSZENBAUM, 2004); Teste de corrente de fuga com rampa de tensão (KLEMPNER & KERSZENBAUM, 2004); Técnica de resistência do isolamento (STONE, 2005); Teste HiPot (STONE *et al.* 2004); Monitoramento de descargas parciais (KLEMPNER & KERSZENBAUM, 2004) (STONE *et al.* 2004); Medição da capacitância (STONE *et al.* 2004); Teste da tangente de perdas (KLEMPNER & KERSZENBAUM, 2004) (STONE *et al.* 2004) (STONE, 2005); Teste de impulso (STONE *et al.* 2004) (STONE, 2005).

A maior desvantagem das técnicas apontadas anteriormente, segundo Dister *et al.* (2000) e Kending & Rogovin (2002), é que elas detectam apenas a ocorrência ou não da falha. Elas não são sensíveis o suficiente para a detecção do início e desenvolvimento de um dano, que pode levar a uma futura falha da máquina. Levando em consideração este problema, as patentes Dister *et al.* (2000) e Kending & Rogovin (2002) propõem a utilização da técnica de análise do espectro de impedâncias do enrolamento da máquina para a predição das falhas no isolamento.

Uma técnica muito semelhante à proposta nas patentes Dister *et al.* (2000) e Kending & Rogovin (2002) é chamada FRA (Frequency Response Analysis) e já é uma técnica consolidada para detecção de danos em transformadores - sendo o procedimento normalizado na IEEE-Std-C57 (2013). Esta técnica é capaz de identificar mudanças nas características físicas do enrolamento da máquina sob teste através da comparação de espectros de impedâncias com seu histórico. Em relação às máquinas rotativas, esta técnica ainda é utilizada de forma experimental, devido à complexidade no comportamento em alta frequência dos enrolamentos (Platero *et al.*, 2012) e na falta de repetibilidade das medidas devido à posição do rotor destas máquinas (Sant'Ana *et al.*, 2016a). De forma a contornar o problema de falta de repetibilidade nas medidas, os trabalhos de Sant'Ana *et al.* (2016a, 2016b e 2017) apresentam métodos estatísticos para a análise dos espectros medidos.

Outro aspecto de grande interesse para a indústria é realização dos testes de forma *online*, de forma que a máquina não precise ser retirada de operação. O problema com este tipo de enfoque está no fato da máquina estar energizada com centenas (as vezes, milhares) de volts e o equipamento de medidas utilizar um conversor digital-para-analógico de poucos volts para injetar os sinais de varredura nos enrolamentos da máquina. O trabalho de Gomez-Luna *et al.* (2013) apresenta formas de adaptação do FRA para a operação *online* através do uso de acoplamentos capacitivos. Em Sant'Ana *et al.* (2016c) é apresentada uma forma de acoplamento com filtro de terceira ordem do tipo C-L-C. Este tipo de acoplamento aumenta a área útil para análise nos espectros ao mesmo tempo em que mantém boa atenuação do efeito da tensão do enrolamento da

máquina energizada sob o equipamento de testes.

Nos trabalhos de Sant'Ana *et. al* (2016a, 2016b, 2016c e 2017) foi utilizado um sistema PicoScope 5203 para a obtenção dos espectros de impedâncias. Este sistema é relativamente caro para os padrões brasileiros e não permite muita flexibilidade em termos de reconfiguração de hardware. Visando maior flexibilidade e menores custos, este presente trabalho propõe a implementação do equipamento de varreduras do espectro de impedâncias em uma plataforma FPGA.

A placa STEMLab, utilizada no desenvolvimento do sistema para este trabalho, é uma plataforma aberta de instrumentação e controle. Em Gama (2018), é apresentado um tutorial para o desenvolvimento de um sistema de geração e aquisição de sinais com a plataforma. O presente trabalho expande o sistema de geração e aquisição de sinais para um sistema completo de análise por espectro de impedâncias. O sistema compreende a parte de *hardware*, responsável pela geração e aquisição de sinais de forma sequencial para uma faixa de frequências definida pelo usuário, o *hardware* também funciona como um servidor TCP/IP, recebendo e enviando comandos e dados ao cliente conectado. A parte de *software*, desenvolvido em C#, é executada em computadores remotos e faz a comunicação com o servidor, fazendo requisições de dados e enviando comandos de configurações ao *hardware*.

Na seção 2 é feita uma breve descrição da técnica de análise de resposta em frequência, e da técnica estatística utilizada. Na seção 3 o sistema completo desenvolvido, composto pelo *hardware* e *software*, é apresentado. Na seção 4 os resultados da aplicação da técnica de FRA com o sistema desenvolvido são analisados. A seção 5 conclui o trabalho.

2. Técnica FRA e estudo estatístico

2.1 Técnica de análise de resposta em frequência (FRA)

A técnica de FRA é uma potente ferramenta de diagnósticos. Ryder (2003) apresenta uma visão bem completa sobre o tema. O método se baseia na injeção de sinais nos enrolamentos da máquina sob teste para a realização do cálculo da impedância desses enrolamentos. Esse procedimento deve ser realizado repetidamente para uma ampla faixa de frequências. Com isso, é obtido o espectro de impedâncias, que deve ser comparado com uma referência, denominada *baseline*. O *baseline* é a condição inicial e conhecida da máquina e será o ponto de partida para análises futuras. Variações do espectro medido em relação ao *baseline* são um indício da ocorrência de algum problema com a máquina, podendo ser um problema elétrico e/ou mecânico. A injeção de uma faixa de frequências na máquina pode ser de duas formas, a primeira é a injeção de um impulso (método de resposta ao impulso), a segunda é a injeção de sinais senoidais de diferentes frequências (método de varredura de frequências).

Ainda, segundo Ryder (2003), a principal vantagem do método de resposta ao impulso com relação ao método de varredura de frequências é o menor tempo gasto para realizar as medições. Em contrapartida, o método de varredura de frequências apresenta melhor relação sinal-ruído, pode ser injetado uma maior faixa de frequências, a quantidade de equipamentos de medição é menor, e a precisão para toda a faixa de frequência analisada é praticamente a mesma. Levando em consideração todas as vantagens apresentadas, o método de varredura de frequências foi o escolhido para a elaboração deste trabalho.

Para a aplicação da técnica de FRA, é necessário a utilização de algum tipo de circuito no equipamento de medidas para fazer a varredura em frequências. Em Lamarre &

Picher (2008), dois circuitos são apresentados. O circuito utilizado neste trabalho está representado na Figura 1.

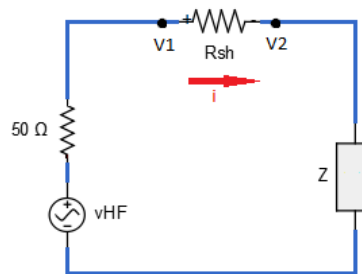


Figura 1: Circuito analisador de impedâncias

Através de uma análise no circuito anterior, a Equação 1 é encontrada. Essa equação é utilizada na obtenção da impedância para uma determinada frequência do sinal aplicado ao circuito. Tomando-se as impedâncias em cada frequência, tem-se o espectro de impedâncias.

$$\vec{Z} = \frac{\vec{V}_2}{\vec{I}} = \frac{\vec{V}_2}{\frac{\vec{V}_1 - \vec{V}_2}{R_{sh}}} = R_{sh} \cdot \frac{\vec{V}_2}{\vec{V}_1 - \vec{V}_2} \quad (1)$$

Onde, \vec{Z} é a impedância a ser calculada, \vec{V}_1 e \vec{V}_2 são as tensões nos pontos apresentados na Figura 1, \vec{I} é a corrente que está circulando entre os pontos \vec{V}_1 e \vec{V}_2 , e R_{sh} é o resistor *shunt*, utilizado para a obtenção do valor da corrente I.

2.2 Soma Absoluta de Erros Estatísticos (ASLE)

Com a utilização da técnica de FRA, o diagnóstico deve ser feito por meio da comparação do baseline com os espectros obtidos. Esse diagnóstico requer uma equipe altamente qualificada, e, ainda assim, está sujeito à subjetividade dos analistas. Para tornar a análise mais objetiva, é comumente utilizado indicadores estatísticos no auxílio do diagnóstico correto (KIM et al. 2005). Uma revisão de literatura sobre estes indicadores é apresentada em Sant'Ana et al. (2016b). Dentre os indicadores apresentados, o ASLE (Absolute Sum of Logarithmic Error) é o mais utilizado nos trabalhos na área e apresenta fácil implementação, tal qual Equação 2.

Esse indicador compara dados em um escala logarítmica. Tem como valor ideal o 0, portanto, quanto mais próximo de 0, maior a semelhança entre os dados, quanto mais afastado, maior a diferença. É considerado um parâmetro bastante efetivo na comparação entre dois conjuntos de dados (KIM et al. 2005) (BADGUJAR et al. 2012).

$$ASLE(x, y) = \frac{\sum_{i=1}^N |20 \log_{10} y_i - 20 \log_{10} x_i|}{N} \quad (2)$$

Onde, N é o número de pontos em cada espectro gerado. x_i é cada ponto do espectro do

sinal analisado. y_i é cada ponto do espectro utilizado como *baseline*.

3. Sistema desenvolvido

3.1 Hardware

A placa STEMLab possui um SoC da família Zynq-7000, fabricado pela Xilinx. O diferencial deste dispositivo é a possibilidade de integração da programabilidade de *hardware* de um FPGA da família Artix-7 com a programabilidade de *software* de um processador dual-core ARM Cortex-A9. A placa ainda apresenta: 16 pinos de GPIOs, dois ADCs e dois DACs de 14 bits e taxa de amostragem de 125Mps, porta Ethernet, entrada para cartão Micro SD, entre outros periféricos (Gama, 2018). Na Figura 2 é mostrada a placa com alguns periféricos destacados.

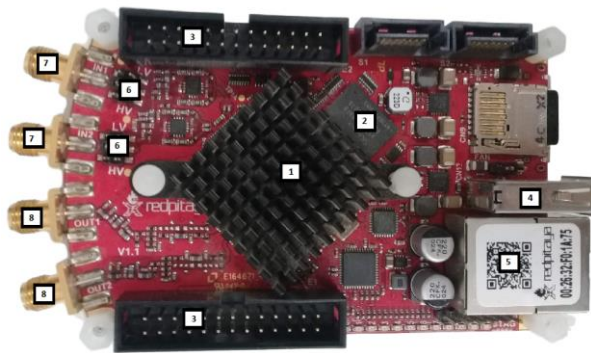
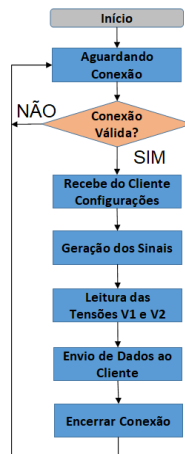


Figura 2 - Visão geral STEMLab. 1: SoC Zynq-7000; 2: RAM; 3: Conectores de extensão; 4: USB; 5: Ethernet; 6: Jumpers escala de tensão de entrada; 7: Entradas analógicas; 8: Saídas analógicas.

No FPGA da placa foi desenvolvido o sistema, baseado em Gama (2018), de geração e aquisição de sinais. Foi também feita a implementação de um protocolo de comunicação cliente-servidor, baseado em TCP/IP. O sistema na plataforma STEMLab funcionará como um servidor, conectado à máquina sob teste e à rede (via ethernet). Ficará aguardando a solicitação de conexão de algum cliente. Quando algum cliente válido fizer a conexão com o servidor, o sistema, primeiramente, receberá do cliente as configurações para seu funcionamento. Dentre as configurações fornecidas, estão a frequência do sinal a ser gerado e a frequência de amostragem para a realização das aquisições. A seguir, será iniciada a geração do sinal na frequência determinada. O sistema de geração de sinais da placa STEMLab é representado pela fonte no circuito da Figura 1. Então, são realizadas as leituras das tensões V_1 e V_2 apresentadas na Figura 1, esse procedimento é feito através das entradas analógicas da placa STEMLab. Os dados são enviados ao cliente remoto via rede. Por fim, a conexão é encerrada e o servidor aguarda uma nova conexão. A Figura 3, a seguir, representa o fluxograma de como o *hardware* foi projetado para funcionar.

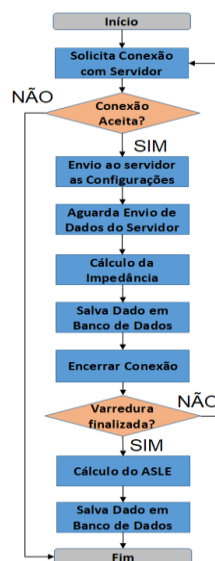
Figura 3 - Fluxograma *hardware*

Para a realização da varredura em frequências, o sistema conta com a possibilidade de gerar sinais senoidais com frequências de 100Hz até de 1MHz.

3.2 Software

O *software*, desenvolvido em C#, será o programa utilizado pelos clientes remotos. Possui três telas principais, uma de configurações, outra para realizar a varredura das frequências e visualizar os espectros obtidos, e uma terceira para a visualização gráfica dos índices estatísticos.

A Figura 4 a seguir apresenta o fluxograma simplificado do código do cliente. O cliente, primeiramente, faz uma solicitação de conexão ao servidor, caso a conexão seja aceita, os dados de configurações (definidos no *software* cliente) são enviados ao servidor. Para uma determinada frequência, o cliente aguarda o envio das tensões V1 e V2 indicadas na Figura 1 e calcula a impedância para esta frequência de acordo com a Equação (1). O dado da impedância é salvo no banco de dados e a conexão é encerrada. Caso a varredura tenha sido concluída, o indicador estatístico ASLE é calculado com base na Equação (2) e é salvo no banco de dados. Caso a varredura não tenha sido concluída, o procedimento é repetido, com novos dados de configurações (frequência de geração e amostragem).

Figura 4 - Fluxograma *software*

4. Resultados experimentais

4.1 Configurações de testes

Para a realização dos testes deste trabalho, utilizou-se um gerador síncrono de dois pólos lisos de 2 kW, 220V, construído de forma customizada em Salomon *et al.* (2015), com taps nos enrolamentos de campo e do estator visando simular falhas nos isolamentos da máquina. A Figura 5 mostra a máquina utilizada para os testes. Em Perisse (2007), constatou-se que a capacitância do enrolamento de uma máquina aumenta conforme o envelhecimento do isolamento. Desta forma, capacitores de diversos valores são inseridos nos taps da máquina, simulando o envelhecimento do isolamento.

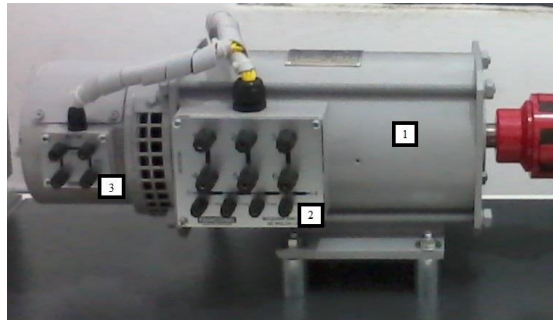


Figura 5 – Gerador utilizado em testes - 1:Gerador síncrono 2kW, 220V; 2: taps para acesso ao enrolamento do estator; 3: taps para acesso ao enrolamento de campo.

As configurações de testes foram as seguintes, como é preciso um *baseline* para servir de base ao cálculo do indicador estatístico, na primeira configuração não foi utilizado nenhum capacitor entre os taps. Para a segunda configuração, foi colocado um capacitor de 10nF entre os taps. Para a terceira, utilizou-se um capacitor de 100nF. Para a quarta situação, um capacitor de 1 μ F. Foi feita ainda uma quinta configuração, com curto-circuito entre os taps. Para cada configuração apresentada anteriormente, 5 varreduras foram realizadas. O *baseline* é calculado como a média dos 5 espectros obtidos em sua configuração.

4.2 Aplicação da técnica FRA

A Figura 6 apresenta os espectros obtidos com a utilização do sistema desenvolvido e aplicação da técnica de FRA.

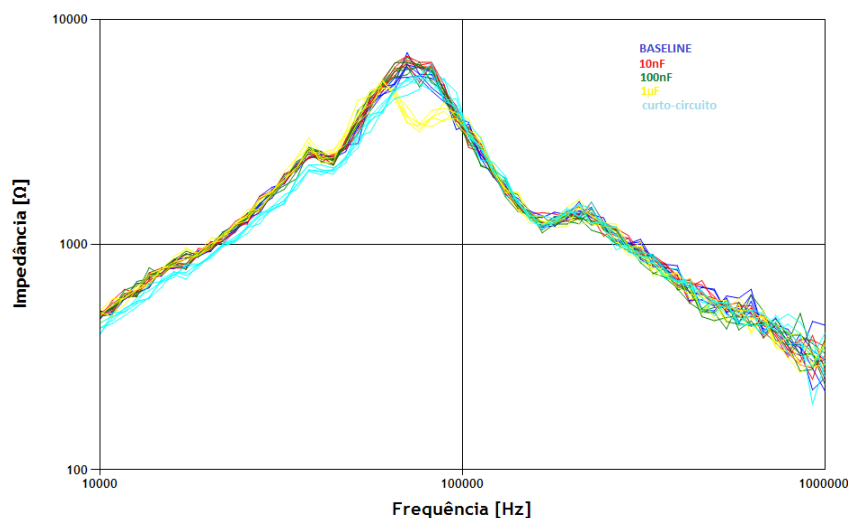


Figura 6 – Espectros de impedância obtidos

Na figura 6, em azul estão as 5 varreduras que foram utilizadas como *baseline*, portanto sem falhas. As falhas são introduzidas de forma progressiva, gerando novos espectros. Em vermelho estão os espectros gerados com a introdução do capacitor de 10nF entre os taps, em verde foi utilizado o capacitor de 100nF, em amarelo o capacitor de 1 μ F, e, em ciano, os taps estão em curto-circuito. Visualmente, observa-se que os espectros do capacitor de 1 μ F e os espectros com os taps em curto-circuito se divergem dos espectros do *baseline*, refletindo o dano simulado no enrolamento do estator. Porém, para os espectros do capacitor de 10nF e 100nF, essa diferença é mais sutil, sendo necessária uma análise visual mais cuidadosa dos espectros.

4.3 Cálculo dos ASLEs

A Figura 7 apresenta os valores obtidos com o cálculo do indicador ASLE. Cada 5 pontos no gráfico representa uma configuração de teste.

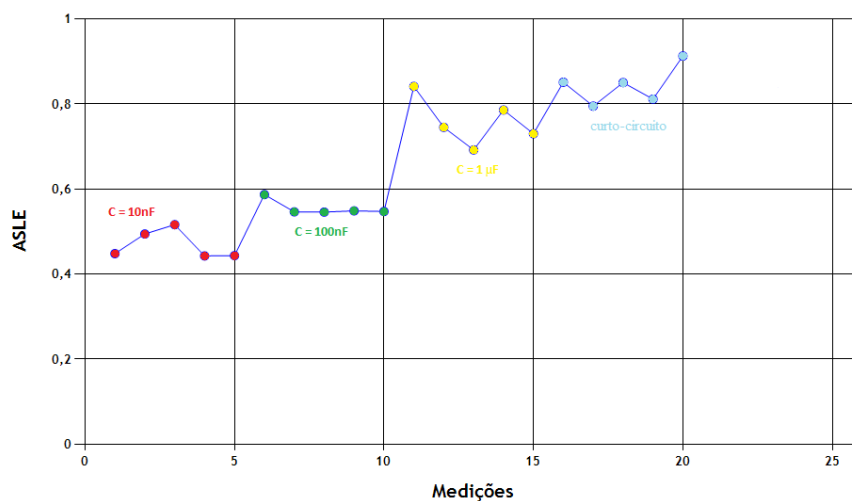


Figura 7 – Curva de tendências dos ASLEs

Observando-se os resultados apresentados na Figura 7, percebe-se claramente a evolução dos danos no enrolamento da máquina para cada configuração de teste definida. Começando com valores entre 0.4 e 0.6 na utilização do capacitor de 10nF e chegando a valores pouco acima de 0.8, com o curto-circuito entre os taps.

Como evidenciado, a utilização de índices estatísticos torna a análise dos dados mais objetiva do que a simples análise visual dos espectros obtidos com a técnica FRA.

5. Conclusão

Neste trabalho foi feita uma demonstração de um sistema embarcado, desenvolvido em FPGA, para previsão de falhas em máquinas elétricas utilizando a técnica FRA. O sistema desenvolvido, composto por *hardware* e *software*, possui ampla aplicação na área industrial e acadêmica. A principal contribuição do presente trabalho é a apresentação de uma tecnologia nacional para previsão de falhas, com menor preço e maior flexibilidade do que as aplicações comerciais. O sistema conseguiu, de forma satisfatória, apontar os danos introduzidos no enrolamento da máquina, confirmando a eficácia da técnica FRA utilizada e o correto funcionamento do sistema. Existem diversas possibilidades de expansão e trabalhos futuros, como, a utilização de outros indicadores estatísticos além do ASLE, outra possibilidade seria a adaptação do sistema para o funcionamento de forma *on-line*.

Agradecimentos

Os autores gostariam de agradecer às seguintes instituições pelo apoio financeiro prestado: CNPq, CAPES, FAPEMIG e P&D ANEEL.

Referências

- BADGUJAR, K. P.; MAOYAFIKUDDIN, M. & KULKARNI, S. V.** *Alternative statistical techniques for aiding SFRA diagnostics in transformers*. IET Generation, Transmission & Distribution, vol. 6, no. 3, pp. 189-198, 2012.
- BRUTSCH, R.; TARI, M.; FROHLICH, K.; WEIERS, T. & VOGELSANG, R.** *Insulation Failure Mechanisms of Power Generators [Feature Article]*. IEEE Electrical Insulation Magazine, vol. 24, no. 4, pp. 17-25, 2008.
- DISTER, C. J.; DELVECCHIO, P. A. & ROGOVIN, D. N.** *System to Provide Low Cost Excitation to Stator Winding to Generate Impedance Spectrum for use in Stator Diagnostics*. (2000) US Patent 6035265.
- DRIF, M. & CARDOSO, A. J.** *Stator fault diagnostics in squirrel cage three-phase induction motor drives using the instantaneous active and reactive power signature analyses*. IEEE Transactions on Industrial Informatics, vol. 10, no. 2, pp. 1348-1360, 2014.
- GAMA, B. R.; SANT'ANA, W. C.; BORGES DA SILVA, L. E.; SALOMON, C. P.; TEIXEIRA, C. E.; CAMPOS, M. M.; LAMBERT-TORRES, G. & BONALDI, E. L.** *Tutorial para implementação de um sistema de aquisição e geração de sinais com fpga utilizando a plataforma de desenvolvimento STEMLab (red pitaya)*. Artigo submetido para Revista Ilha Digital em 09/08/2018.
- GOMEZ-LUNA, E.; APONTE MAYOR, G.; GONZALEZ-GARCIA, C. & PLEITE GUERRA, J.** *Current Status and Future Trends in Frequency-Response Analysis With a Transformer in Service*. IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 28, no. 2, pp. 1024-1031, 2013.
- IEEE-Std-C57.** *IEEE Guide for the Application and Interpretation of Frequency Response Analysis for Oil-Immersed Transformers*. IEEE Std C57.149-2012, vol., no., pp.1-72, 2013.
- KENDING, M. W. & ROGOVIN, D. N.** *Method of Conducting Broadband Impedance Response Tests to Predict Stator Winding Failure*. (2002) US Patent 6483319B1.
- KIM, J. W.; PARK, B.; JEONG, S. C.; KIM, S. W. & PARK, P.** *Fault diagnosis of a power transformer using an improved frequency-response analysis*. IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 20, no. 1, pp. 169-178, 2005.
- KLEMPNER, G. & KERSZENBAUM, I.** *Operation and Maintenance of Large Turbo-Generators*. IEEE Press Series on Power Engineering. Wiley, 2004.
- LAMARRE, L. & PICHER, P.** *Impedance Characterization of Hydro Generator Stator Windings and Preliminary Results of FRA Analysis*. Conference Record of the 2008 IEEE International Symposium on Electrical Insulation, Vancouver, BC, pp. 227-230, 2008.
- PERISSE, F.; WERYNSKI, P. & ROGER, D.** *A new method for AC machine turn insulation diagnostic based on high frequency resonances*. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, vol. 14, no. 5, pp. 1308-1315, 2007.
- PLATERO, C.A.; BLAZQUEZ, F.; BLANQUEZ, F.R.; REBOLLO, E.; BATLLE, B. & FERNANDEZ-SANCHEZ, E.** *Application of Sweep Frequency Response Analysis (SFRA) for Interturn Detection of in Medium-voltage Coils Manufacturing*. 44th International Conference on Large High Voltage Electric Systems, 2012.
- RYDER, S. A.** *Diagnosing transformer faults using frequency response analysis*. IEEE Electrical Insulation Magazine, vol. 19, no. 2, pp. 16-22, 2003.
- SALOMON, C.P.; SANT'ANA, W.C.; BONALDI, E.L.; DE OLIVEIRA, L.E.L.; BORGES DA SILVA, J.G.; LAMBERT-TORRES, G.; BORGES DA SILVA, L.E.; PELLICEL, A.; LOPES, M.A.A. & FIGUEIREDO, G.C.** *A system for turbogenerator predictive maintenance based on Electrical Signature Analysis*. 2015 IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference (I2MTC) Proceedings, Pisa, pp. 79-84, 2015.
- SANT'ANA, W.C.; LAMBERT-TORRES, G.; BORGES DA SILVA, L.E.; BONALDI, E.L.; DE**

LACERDA DE OLIVEIRA, L.E.; SALOMON, C.P. & BORGES DA SILVA, J.G. *Influence of rotor position on the repeatability of frequency response analysis measurements on rotating machines and a statistical approach for more meaningful diagnostics.* Electric Power Systems Research, vol. 133, pp. 71-78, 2016.

SANT'ANA, W.C.; SALOMON, C.P.; LAMBERT-TORRES, G.; BORGES DA SILVA, L.E.; BONALDI, E.L.; LACERDA DE OLIVEIRA, L.E. & BORGES DA SILVA, J.G. *A survey on statistical indexes applied on frequency response analysis of electric machinery and a trend based approach for more reliable results.* Electric Power Systems Research, vol. 137, pp. 26-33, 2016.

SANT'ANA, W.C.; SALOMON, C.P.; LAMBERT-TORRES, G.; BORGES DA SILVA, L.E.; BONALDI, E.L.; DE LACERDA DE OLIVEIRA, L.E. & BORGES DA SILVA, J.G. *Early detection of insulation failures on electric generators through online Frequency Response Analysis.* Electric Power Systems Research, Vol. 140, pp. 337-343, 2016.

SANT'ANA, W.C.; SALOMON, C.P.; LAMBERT-TORRES, G.; BORGES DA SILVA, L.E.; BONALDI, E.L.; DE OLIVEIRA, L.E.L. & BORGES DA SILVA, J.G. *On the use of hypothesis tests as statistical indexes for frequency response analysis of electric machinery.* Electric Power Systems Research, vol. 147, pp. 245-253, 2017.

STONE, G.; BOULTER, E. A.; CULBERT, I. & DHIRANI, H. *Electrical Insulation for Rotating Machines: Design, Evaluation, Aging, Testing, and Repair.* IEEE Press Series on Power Engineering. Wiley, 2004.

STONE, G. C. *Recent important changes in IEEE motor and generator winding insulation diagnostic testing standards.* IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 41, no. 1, pp. 91-100, 2005.

SUMEREDER, C. *Statistical lifetime of hydro generators and failure analysis.* IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, vol. 15, no. 3, pp. 678-685, 2008.