



XX Seminário Nacional de Distribuição de Energia Elétrica
SENDI 2012 - 22 a 26 de outubro
Rio de Janeiro - RJ - Brasil

Italo Costa Tavares	Manuel Luís Barreira Martinez	Jorge Luiz De Franco
ENERGISA MINAS GERAIS DISTRIBUIDORA DE ENERGIA S/A	Universidade Federal de Itajubá	Franco Engenharia Ltda.
italo.costa@energisasolucoes.com.br	martinez@lat-efei.org.br	franenge@terra.com.br

Sanderson Rocha de Abreu	Marcel Antonionni de Andrade Romano	Angelo Rocha Oliveira
ENERGISA SOLUÇÕES S.A.	Franco Engenharia Ltda.	Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais
sanderson@energisasolucoes.com.br	antonionni@gmail.com	angelorochoaoliveira@yahoo.com.br

Sistema para Análise Digital de Resultados de Ensaios de Impulso Atmosférico em transformadores de Média Tensão.

Palavras-chave

Análise de impulso atmosférico
software
transformadores.

Resumo

O presente trabalho apresenta o desenvolvimento de um sistema para análise digital de resultados de ensaios de impulso atmosférico em transformadores de média tensão a fim de se reduzir a interferência humana na decisão sobre falhas em transformadores durante este tipo de ensaio. O sistema consiste na aquisição de sinais de tensão e corrente diretamente de um osciloscópio aliado à aplicação de técnicas de filtragem aos sinais, a fim de que componentes espúrios sejam eliminados e defeitos sejam sobressaltados, os quais se manifestam como alterações de amplitude e modos de oscilações em frequência, nem sempre fáceis de serem detectados através de simples inspeção visual. Os resultados parciais obtidos mostram uma abordagem promissora e independente da interferência humana, no que tange ao laudo sobre as condições do transformador.

1. Introdução

1. INTRODUÇÃO

As técnicas de análise dos oscilogramas de tensão e corrente envolvem um elevado grau de conhecimento dos fenômenos transitórios no interior dos transformadores, normalmente associado com a experiência dos inspetores. Logo, o processo de identificação e localização de falhas passa a ser bastante subjetivo. Uma das maneiras para remover esta subjetividade é fazer uso de técnicas de análise no domínio digital ao longo das aplicações de impulso exigidas nos ensaios de transformadores.

Com advento dos sistemas de aquisição de dados e dos osciloscópios digitais de alto desempenho muitas das antigas técnicas para análise das respostas frente a impulsos dos transformadores podem ser revistas e/ou aprimoradas. Os principais problemas observados são os relacionados com a existência e a interpretação de oscilações de alta frequência presentes nos oscilogramas de corrente. Por meio de técnicas de simulações em modelos equivalentes de transformadores é possível demonstrar que muitas destas oscilações não estão relacionadas a falhas e poderiam reprovar a unidade sob ensaio, ao se utilizar as técnicas atualmente estabelecidas. Este projeto tem por objetivo verificar modos de retirar a subjetividade da decisão por meio de análises matemáticas.

O sistema proposto visa a permitir uma análise mais elaborada sobre os resultados dos ensaios de impulso em transformadores. O ponto não é somente a análise, mas sim a incorporação de critérios de modo a evitar que a inexperiência do analista ou qualquer critério não técnico, auxilie na aprovação de unidades com baixa suportabilidade dielétrica. A grande maioria das falhas observadas nos transformadores de distribuição é de origem dielétrica. Assim, surge o “famoso” questionamento sobre as altas correntes de descarga atmosférica, que estudos recentes indicam que não são tão elevadas, ou ainda, sobre a baixa qualidade dos pára-raios, o que de um modo geral para as correntes de descarga esperadas não é verdade. As evidências apontam para a qualidade do isolamento dos transformadores, que é verificada nos ensaios de impulso atmosférico. Erros de interpretação dos sinais dos oscilogramas atuam no sentido de introduzir erros fracos no sistema com custos extras de reposição e interrupção de energia.

O arcabouço bibliográfico necessário ao desenvolvimento do trabalho consiste em usar a experiência da Equipe do LAT-EFEI sob responsabilidade do coordenador do presente projeto, Professor Manuel L. B. Martinez. Essa experiência pode ser resumida pela operação quase contínua por aproximadamente 50 anos do LAT-EFEI no campo de ensaios e análises de transformadores sob impulso e nas seguintes dissertações de mestrado: em [1], é discutida a eficiência de transformadores de média tensão; em [2] há discussão sobre avaliação econômica de transformadores de distribuição com base no carregamento e eficiência energética; em [3] são mostrados modelos para surtos para transformadores de média tensão. A NBR 5356 [4] tem uma seção dedicada à interpretação de oscilogramas de impulsos atmosféricos, onde são descritas as formas mais usuais de identificação de anomalias neste tipo de ensaio.

Esses documentos reunidos mostram a necessidade de se adquirir sempre transformadores eficientes e confiáveis, mostra quesitos que os qualificam como tal, discorrem sobre toda a estrutura dos ensaios de impulso atmosférico, bem como indicam o caminho a trilhar para o desenvolvimento de sistema de identificação inovador, que não depende de interpretações subjetivas para verificar eventuais falhas em transformadores, no que tange aos problemas indicados pelos ensaios de impulso atmosférico.

O presente trabalho mostra metodologia e resultados do desenvolvimento do projeto de Pesquisa e Desenvolvimento número 6585_007_2010 com o título: **DESENVOLVIMENTO E IMPLEMENTAÇÃO DE UM SISTEMA PARA ANÁLISE DIGITAL DOS RESULTADOS DOS ENSAIOS DE IMPULSO ATMOSFÉRICO EM TRANSFORMADORES DE MÉDIA TENSÃO**, que está em fase de execução e tem o objetivo de gerar uma metodologia e um software para análise dos sinais de ensaio de impulso em transformadores, de grande utilidade na medida em que ensaios de recebimento e de qualidade poderão ser realizados dentro do laboratório da empresa, aumentando a eficiência do controle de qualidade por parte da empresa no que tange à aquisição de transformadores. Os resultados preliminares mostram um sistema robusto e eficiente.

Como benefícios esperados com a conclusão do projeto esperam-se uma melhor qualificação de fornecedores e, por conseqüência uma redução das perdas operacionais resultantes da queima e substituição de transformadores, resultando na melhoria da qualidade do serviço prestado pela concessionária.

2. Desenvolvimento

2. ENSAIOS DE IMPULSO ATMOSFÉRICO

Os ensaios de impulso atmosférico são regidos pela Norma Brasileira ABNT NBR 5356-4, [1] que é o guia para ensaio de impulso atmosférico e de manobra para transformadores e reatores. Essa norma informa sobre a forma dos impulsos, circuitos de ensaio dentre outros aspectos, também informando sobre técnicas de medição e interpretação dos resultados.

O circuito de ensaio completo é composto basicamente das seguintes partes: gerador de impulso, objeto sob ensaio, circuito de medição de tensão e o circuito para detecção de falhas. O presente trabalho, em seu estágio inicial, não visa à análise de formas de impulsos cortados nem a detecção de falhas por meio da tensão transferida.

O gerador de impulso é responsável pela geração das tensões impulsivas normalizadas aplicadas ao transformador sob ensaio. As tensões e correntes aplicadas são medidas por meio osciloscópio acoplado a um divisor de tensão e um shunt, respectivamente.

O procedimento de detecção de faltas no estado da arte é baseado na análise de registros oscilográficos, tendo como mecanismos principais a comparação entre os oscilogramas de impulsos com valores reduzidos ou entre registros sucessivos. A referida norma também traz registros oscilográficos típicos que auxiliam a interpretação dos oscilogramas obtidos durante o ensaio.

A análise é sempre feita de forma manual, baseando-se na experiência de um examinador. Como elemento complicador, em oscilogramas de corrente pode ocorrer de forma freqüente perturbações não relacionadas a problemas relacionados ao objeto sob ensaio, dificultando a interpretação dos registros oscilográficos.

3. DESENVOLVIMENTO DA PESQUISA

Tanto no método de análise tradicional quanto na metodologia proposta, os componentes são os mesmos, com a diferença ocorrendo na aquisição e processamento dos sinais provenientes do ensaio. A estrutura de ensaios captura as oscilações nas ondas de corrente nos transformadores, com armazenamento e tratamento sendo realizado de forma a gerar padrões, ou melhor, assinatura de cada tipo de evento ocorrido nos ensaios de impulso dos transformadores. Estão sendo aplicadas técnicas de tratamento de sinais como filtros digitais, análises no tempo e na frequência entre outras.

3.1. Análises Iniciais do Ensaio

Os primeiros ensaios foram executados no LAT-EFEI, em Itajubá, em um transformador trifásico novo, de potência 45kVA. Foi definido que seriam feitos vários ensaios, com diferentes percentuais de NBI (nível básico de isolamento), de forma a se obter uma considerável quantidade de curvas. A primeira questão a ser esclarecida refere-se à necessidade de se ter 1 ou 2 curvas para analisar o comportamento do transformador. Foi constatado que há perda de informação relevante da frente do impulso quando se utiliza a escala de tempo 10ms. Outra observação pertinente é que, por melhor que seja a resposta em frequência o transformador de corrente Pearson “mascara” informações importantes.

A série de ensaios executados mostrou que as verificações na frente dos impulsos deveriam ser feitas com regulagem de escala de tempo em 400ns. Para analisar características da cauda, a regulagem de escala de tempo deve ser de 10 ms. Para que seja capturada a onda inteira, o ajuste da escala de tempo deve ser de 20 ms. Outra conclusão importante é que o ensaio é invasivo. Após os 2 dias de ensaios consecutivos, observou-se a ocorrência de problemas no transformador que não eram observados no início dos ensaios. Essa observação é pertinente, na medida em que, para as análises, a melhor opção é realizar o menor número de ensaios possíveis. Observou-se que não é possível estabelecer com precisão o valor da tensão de impulso para cada ensaio, o que significa que, na necessidade de se fazer ensaios separados para capturar curvas de frente e cauda, não há como garantir uma análise correta. O ideal é curvas de frente e cauda sejam capturadas em um mesmo ensaio.

A estratégia inicial para análise dos sinais baseou-se na impedância variante no tempo, além das curvas de tensão e corrente. Foi concluído que realmente não há como fazer análise de frente e cauda em uma única curva, a partir de osciloscópios com capacidade de armazenamento de 10 mil pontos. Neste contexto, duas opções são viáveis: osciloscópio com capacidade de armazenamento de mais pontos ou equipamento com dupla base de tempo e 4 canais, de forma a se obter em um mesmo ensaio as curvas de frente e cauda com a resolução necessária para que as análises pertinentes sejam feitas.

Optou-se pela aquisição de um osciloscópio Tektronix MSO 4034 [5], com base em comparações com o equipamento com o TDS3052B, do mesmo fabricante. As principais diferenças entre estes equipamentos são o número de pontos adquiridos por ensaio (enquanto o TDS tem a capacidade de 10mil pontos por ensaio o MSO armazena 10 milhões de pontos por ensaio) e o número de canais (o TDS possui 2 canais e o MSO possui 4 canais).

Com o uso do MSO4034, um único ensaio é suficiente para adquirir frente e cauda.

Com a utilização do osciloscópio MSO4034 foi possível verificar a importância do aumento de resolução vertical. Ademais, há a necessidade de se analisar frente e cauda de onda em um mesmo ensaio, o que não é possível quando se usa um equipamento como o TDS, que tem capacidade de armazenamento de apenas 10

mil pontos, enquanto o MSO 4034 tem capacidade de armazenamento de 10 milhões de pontos.

3.2. Documentação do Software

No que tange a banco de dados relacional, será usado SQL Server (2005/2008) para armazenamento das curvas de ensaios. A linguagem de programação será C# (C Sharp), versão Visual Studio 2008. É importante salientar que, na fase atual do projeto, todas as metodologias estão sendo testadas em Matlab, antes da plataforma definitiva.

As questões relacionadas a TI (tecnologia da informação) foram divididas em 2 partes: problema matemático e interação com o usuário. No que concerne ao problema matemático, optou-se pelo uso de “dll” de funções matemáticas já existentes, desde que devidamente documentadas. No caso da interação com o usuário, ficou definido que o padrão de aplicativo web usado pela Energisa será usado neste projeto.

3.3. Comunicação Computador x Osciloscópio

Para validação do processo de comunicação do sistema de análise digital de ensaios de impulso atmosférico em transformadores de média tensão optou-se por desenvolver todos os algoritmos em Matlab antes do desenvolvimento em uma plataforma comercial.

A primeira abordagem para a transferência das curvas provenientes do ensaio é a transferência direta via pen drive. Apesar de o método possibilitar a transferência de todos os dados necessários o mesmo consome um intervalo de tempo considerável (aproximadamente 5 minutos por curva ao se transferirem 10.000.000 de amostras). Desse modo, a busca de uma forma alternativa de comunicação torna-se essencial para a melhoria do tempo de análise.

A memória do osciloscópio pode ser acessada por TCP/IP por meio do TekVisa, que é uma implementação de um protocolo de comunicação com instrumentos, fornecido pelo fabricante Tektronix. Os dados de aquisição do osciloscópio vão diretamente para a memória do Matlab via rede Ethernet, um processo muito mais rápido que o anterior. O tratamento das variáveis dentro do Matlab é matricial e a biblioteca utilizada permite o ajuste dos parâmetros de captura do equipamento de forma remota, permitindo a automatização de todo o processo de análise das curvas do ensaio de impulso do transformador.

Entretanto, para que a aplicação comercial possa ser viabilizada, todos os algoritmos devem ser desenvolvidos na Linguagem C.

Iniciando esse processo, foi desenvolvido o algoritmo que viabiliza a comunicação rápida do software que está sendo desenvolvido com o osciloscópio MSO 4034. Cabe observar que parte do referido código já existia em algumas aplicações da Tektronix. Entretanto, devido a problemas com funções existentes no mesmo (problemas esses a Tektronix no Brasil não conseguiu solucionar), parte do código não pode ser aproveitada, o que aumentou a complexidade do desenvolvimento. Verificando-se erros e simulando-se possibilidades, chegou-se ao código definitivo, que executa a tarefa com alta velocidade, se comparado a outros métodos de comunicação, como a porta USB e o Matlab (o acesso direto à biblioteca da TEK é o

método mais ágil para comunicação com o osciloscópio).

O código desenvolvido para comunicação software com o osciloscópio Tektronix mostrou alto desempenho.

3.4. Metodologia de Filtragem e Análise dos sinais

Foram testadas estratégias de filtragem e análises dos sinais a fim de se obter uma metodologia apropriada para o problema da identificação de falhas em transformadores sob ensaios de impulso atmosférico.

Para se capturarem os eventos de frente e cauda simultaneamente, torna-se necessário uma resolução vertical (número de bits de conversão) maior que o disponível no equipamento de aquisição de dados. Uma das formas de se conseguir essa resolução é a partir da aquisição de um grande número de pontos e o uso de ferramentas de processamento de sinais para, a partir dos pontos excedentes, ter-se uma estimativa do valor real da media.

Dentre as técnicas de processamento de sinais, foram testados um algoritmo de média móvel centrada (com diversos números de pontos) e um algoritmo de filtragem passa-baixas *Chebyshev*, com 30 pólos (FIR e IIR), seguido de uma decimação em diversos intervalos. Tais técnicas são viabilizadas com o uso do MSO4034, que captura 10 milhões de pontos [6].

Outra forma de se conseguir os resultados necessários é com o uso de um instrumento de 4 canais, ajustados de modo a se adquirir o mesmo sinal em 2 escalas de amplitude diferentes: uma otimizada para capturar os detalhes na frente de onda e outra otimizada para capturar os detalhes na cauda. Esse artifício não precisou ser utilizado pois, com somente 1 ensaio, todas as análises podem ser feitas (para um mesmo valor percentual NBI).

No que tange ao teste de estratégias de filtragem de sinais, preliminarmente foram aplicados testes com filtros de Fourier e convolução, os quais se mostraram ineficientes quando aplicados nos dados obtidos a partir de curvas extraídas do osciloscópio TDS3052B.

Nesta fase serão definidos os algoritmos de detecção sob 2 abordagens distintas: Aplicação de Transformada de Fourier e Transformada Wavelet.

No que tange à Transformada de Fourier, a mesma pode ser contínua ou discreta. No presente projeto optou-se por utilizar a transformada discreta, haja vista que os sinais são discretizados pela própria frequência de amostragem do osciloscópio MSO 4034. O mesmo vale para a Transformada Wavelet.

Pode-se definir Transformada de Fourier como uma operação matemática que decompõe o sinal nas várias frequências que o constituem. Essa ferramenta passa um sinal do domínio do tempo para o domínio da frequência.

A intenção ao utilizar essa ferramenta, é observar o comportamento do grupo de frequência das quais é composta a janela de amostragem analisada e verificar variações, significativas ou não, na composição de quantidade de frequências da amostras com a evolução das janelas de amostragem através da resposta de impulso.

3. Conclusões

4. CONCLUSÕES

Os resultados preliminares do software para análise de ensaios de impulso atmosférico em transformadores de média tensão são promissores. Os testes realizados mostram que defeitos não detectados pelo método tradicional foram detectados pelo sistema. Estão em fase de testes os algoritmos para validação e para análises das oscilações em frequência. É pertinente salientar que o maior benefício para a concessionária será a melhoria do processo interno de recebimento e avaliação dos equipamentos adquiridos, gerando melhoria na qualidade do serviço e redução de custos operacionais das equipes de manutenção, bem como o desenvolvimento dos fornecedores. Outra vertente a ser estudada em um projeto futuro é adequação do Software para análise de impulsos de onda cortada.

4. Referências bibliográficas

[1].Cardoso, B. P. “Eficiência de transformadores de média tensão”. Dissertação de Mestrado em Engenharia Elétrica. Universidade Federal de Itajubá, Setembro, 2005.

[2].Picanço, A. F., “Avaliação Econômica de Transformadores de Distribuição com Base no Carregamento e Eficiência Energética”. Dissertação de Mestrado em Engenharia Elétrica. Universidade Federal de Itajubá, Abril de 2006.

[3].BACHEGA, R. J. “Modelos para surtos para transformadores de média tensão” Dissertação de Mestrado em Engenharia Elétrica. Universidade Federal de Itajubá, Abril, 2006.

[4].NBR 5356-4 Guia para ensaio de impulso atmosférico e de manobra para transformadores e reatores, ABNT, 2008.

[5].Tektronix, Test and Measurement Instrumentation, disponível em <http://www.tek.com/products/oscilloscopes/mso4000/>, acessado em 23 de junho de 2010.

[6].A. V. Oppenheim, A. S. Willsky, H. Nawab. Signals and Systems. Pearson Education. [ISBN 0-13-814757-4](#), 1998.

[7].A. Mertins. Signal Analysis – Wavelets, Filter Banks, Time-Frequency Transforms and Applications, Wiley and Sons, ISBN 0-471-98626-7, 1999.
