

Desenvolvimento de Novas Técnicas e Processos para Aperfeiçoamento de Transformadores para Operarem em Situações Frente a Óleos Contendo Enxofre Corrosivo

Silsonmar da Rocha Costa, José Mak, Newton J. Guaraldo, Adelfo B. Barnabé, Flávio Faria, Claudio Aparecido Galdeano e Victor Sokolov (in memoriam)

Resumo – Este artigo apresenta o Projeto de P&D da EDP LAJEADO, “Desenvolvimento de Novas Técnicas e Processos para Aperfeiçoamento de Transformadores para Operarem em Situações Frente a Óleos Contendo Enxofre Corrosivo”, finalizado em junho de 2.011. A existência de uma família de 5 transformadores de grande porte e extra alta tensão apresentando problemas relacionados com a presença de enxofre corrosivo permitiu um avanço de conhecimento, pois pela primeira vez efetuou-se a autópsia em equipamentos falhados e sadios da mesma família, utilizando os conhecimentos de projeto de transformadores para localizar pontos de estresses, pontos esses que foram utilizados para balizar as amostragens ideais para ensaios físico-químicos, permitindo avaliar e definir com clareza a influência do óleo contendo enxofre corrosivo nas falhas ocorridas. Outro ponto de inovação está relacionado ao desenvolvimento de uma nova metodologia para detecção de problemas de projeto de transformadores em serviço, processos estes que foram introduzidos nos manuais de especificação, de operação e de manutenção da concessionária.

A inovação da prospecção de falhas e defeitos orientados por pontos ou origens de estresses definidos pela revisão de projeto permitiu um avanço no estado da arte na visualização de problemas com transformadores de potência contendo óleo com enxofre corrosivo ou de outras falhas incipientes.

Palavras-chave – Transformador de Grande Porte, Revisão de Projetos Construtivos, Design Review, Óleo Isolante Contendo Enxofre Corrosivo.

I. INTRODUÇÃO

Os objetivos básicos das revisões de projeto para este estudo foram:

Assegurar o entendimento claro e mútuo dos requisitos técnicos; verificar os requisitos de sistema e projeto e para in-

Esse trabalho foi desenvolvido no âmbito do Programa de Pesquisa e Desenvolvimento Tecnológico do Setor de Energia Elétrica regulado pela ANEEL.

S. R. Costa trabalha na EDP Lajeado (e-mail silsonmar.costa@edpbr.com.br).

J. Mak, N. J. Guaraldo, A. B. Brás e F. Faria trabalham para o CGTI (e-mail: josemak@buenomak.com.br; newton@buenomak.com.br; barnabe@buenomak.com.br; ffaria@buenomak.com.br).

C. A. Galdeano trabalha na MGM (e-mail claudio@mgmdiag.com.br)

Victor Sokolov, Grande profissional e querido amigo - Falecido

dicar áreas onde pode haver necessidade de atenção especial, verificar a conformidade do projeto em relação aos requisitos técnicos e identificar características e avaliar sua confiabilidade e riscos.

A revisão de projeto examinou a capacidade funcional do transformador de operar dentro dos requisitos operacionais especificados e contemplar as seguintes considerações:

- Informações ambientais,
- Especificação de requisitos,
- Projeto do transformador,
- Fabricação,
- Dados de sistema,

Apesar de ser esperado que a revisão de “projeto do transformador” venha a consumir a maior parte da atenção, cada um dos estágios de revisão é importante para operação em serviço, com confiabilidade.



Figura 1. Uma unidade transformadora das 5 idênticas da mesma família em estudo.

A inovação apresentada neste trabalho está no fato de que foi usado pela primeira vez a autópsia de transformadores de grande porte e extra alta tensão, falhados e sadios da mesma família, utilizando os conhecimentos de projeto de transformadores para localizar pontos de estresses, pontos esses que foram utilizados para balizar as amostragens ideais para ensaios físico-químicos, permitindo avaliar e definir com clareza a influência do óleo contendo enxofre corrosivo nas falhas ocorridas no Brasil em unidades transformadoras de grande porte extra alta tensão. Outro ponto de inovação está relacionado desenvolvimento de uma nova metodologia para detecção de problemas de projeto de transformadores em serviço, inexistente atualmente.



Figura 2. Metodologia e foco do projeto (área cinza)

O Projeto de P&D o Projeto de P&D da EDP LAJEADO, “Desenvolvimento de Novas Técnicas e Processos para Aperfeiçoamento de Transformadores para Operarem em Situações Frente a Óleos Contendo Enxofre Corrosivo”, teve o recurso financeiro aportado pela EDP. As executoras foram o CGTI – Centro de Gestão de Tecnologia e Inovação, e a B&M Pesquisa e Desenvolvimento, com apoio da MGM Diagnóstico, sediadas em Campinas (SP).

II. PROCEDIMENTOS DE REVISÃO DE PROJETO (DESIGN REVIEW)

Os Procedimentos de Revisão de Projeto foram elaborados para utilização em transformadores e reatores novos durante suas fases de Especificação e Comissionamento e auxiliam na avaliação de condições de projeto e construção desses equipamentos, bem como na análise de ocorrências com os mesmos durante a utilização, onde procedimentos convencionais nem sempre são suficientes para identificar as causas envolvidas. Podem também ser aplicados em transformadores em operação, desde que estes possuam disponíveis informações precisas sobre suas características de projeto e de ensaios de fabricação.



Figura 3. Retirada do núcleo.



Figura 4. Análise forense do enrolamento de BT.

Foi realizada a desmontagem de uma unidade falhada para analisar as evidências da falha ocorrida e relação com defeitos do equipamento e/ou sistêmicos, baseados na revisão de projeto. Denominamos a esses novos procedimentos de autópsia de “Análise Forense”.

No caso dos transformadores elevadores de Lajeado o desmantelamento para inspeção dos bobinados danificados nos transformadores falhados, deu oportunidade de levantar dimensões e informações de componentes internos dos transformadores conforme construídos (as built), possibilitando conseguir informações que de outra forma não seriam acessíveis. Estes transformadores também possuíam documentação de projeto e construção bastante detalhados e possibilitaram com o auxílio do fabricante, levantar informações suficientes para a aplicação de procedimentos de Revisão de Projeto aos mesmos.

Para possibilitar estas técnicas de Análise Forense foram introduzidos ensaios especiais e novos equipamentos de monitoramento e registro, entre eles, a medição de temperatura para conferir o desempenho do “as built”, processo este incluso no manual de especificação e comissionamento. (Figura 5)

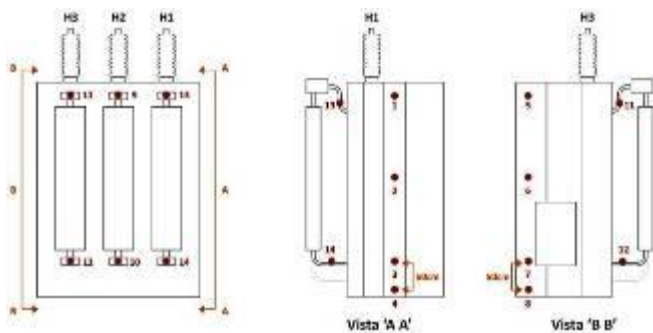


Figura 5. Medição de temperatura com indicação de pontos de medição.

Onde:

Pontos 1 e 5 – Parte superior da caixa do trafo, próximo à tampa.

Pontos 2 e 6 – Ponto médio da caixa do trafo.

Pontos 3 e 7 – Ponto à altura da entrada da tubulação inferior do radiador na caixa do trafo (chegada do óleo da bomba de circulação).

Pontos 4 e 8 – Ponto inferior da caixa do trafo, próximo ao fundo.

Pontos 9, 11 e 13 – Pontos à altura das saídas das tubulações superiores dos radiadores da caixa do trafo (saída da bomba de circulação).

Pontos 10, 12 e 14 – Pontos à altura das entradas das tubulações inferiores dos radiadores, na caixa do trafo (chegada do óleo vindo da bomba de circulação)

Verificaram-se os modos de falha, grandezas e efeitos das energias destrutivas envolvidas e as alterações físico-químicas resultantes nos isolantes sólidos e líquido.



Figura 6. Ponto de falha lado externo da bobina de alta de 230 kV



Figura 7. Face interna da bobina - Local do arco.



Figura 8. Análise forense do condutor isolado.

Evidências de depósito de cobre metálico no condutor e no papel kraft foram registradas (Figs 8 e 9).

Além das amostragens e ensaios físicos químicos tradicionais procurou-se incrementar processos, que detectassem e/ou dimensionassem partículas macro e microscópicas, campos elétricos e contribuições transitórias do sistema elétrico no qual os transformadores estão inseridos, de modo a inserir dados e grandezas até aqui não abordadas ou estudadas.



Figura 9. Papel isolante externo com depósito de enxofre.

Entretanto, apesar das evidências de defeito apresentadas pela contaminação por cobre metálico no condutor e no papel isolante e ainda a redução das características dielétricas e de vida útil em uma unidade, todas as grandezas físico-químicas medidas estavam ainda dentro das suas faixas operativas confiáveis.

Ainda restava o desconhecimento do “gatilho” responsável pela evolução do defeito para a falha.

III. ESTUDO DO GATILHO

Apesar da existência de várias pesquisas e trabalhos sobre Enxofre Corrosivo, muitas perguntas ainda não haviam sido satisfatoriamente esclarecidas e nem havia qualquer informação consistente de como se iniciava e como se desenvolvia o processo de falha nos transformadores e reatores, principalmente no que concerne ao “gatilho” da falha.

Sob condições normais de operação em transformadores de potência isolados a óleo, as perdas dielétricas devido à condutividade causada por elétrons no isolamento do papel impregnado de óleo, bem como o mecanismo de transporte de elétrons livres são insignificantes em comparação com aqueles causados por condutividade induzida de partículas macroscópicas e iônicas. Entretanto, em locais de estresse elevado (por exemplo, partes ásperas e pontiagudas na estrutura do transformador), a vaporização do óleo mineral, que rapidamente forma uma cavidade de alta pressão de vapor provocando o desenvolvimento de descargas parciais: estas são encontradas na forma de pulsos de descargas parciais.

Verificou-se a existência de perfurações de formato cônico de dentro para fora, sugerindo que descargas parciais anteriores à falha migraram do cobre para o óleo isolante (Fig 10)



Figura 10. Efeito perforante com migração da energia de dentro para fora em local liso e sem pontas.

Tanto o local do estresse (com ausência de partes ásperas ou pontiagudas) como a grande distância dos canais de óleo (temperatura mais elevada), não explicam a geometria do possível início de falha apresentado em uma das espiras (Fig 10).

Partículas Macroscópicas e Portadoras de Carga

- Partículas em hidrocarbonetos não polares podem exibir um comportamento similar aos dos íons. Embora, como o tamanho das partículas é substancialmente maior do que o dos íons, sua mobilidade é consideravelmente menor.

- A partícula pode ser metálica, semicondutora ou isolante.

- A carga que a partícula adquire irá depender do tempo de contato e da área que eles fazem contato com os eletrodos.

- Embora seja esperado que sua carga exceda consideravelmente as das partículas iônicas portadoras de carga; mesmo que as correntes de perdas dielétricas devido às partículas carregadas possuam baixa mobilidade, podem ser bastante perceptíveis e dadas por:

$$I = q / t$$

Partículas Microscópicas e Portadoras de Carga

As cargas contidas nas partículas vão atrair uma nuvem de íons com cargas opostas ou partículas menores, que irão levar a formação da chamada carga Helmholtz de dupla camada.

Isso irá resultar na criação de um campo elétrico, ζ ,

$$\zeta = qd / \epsilon'$$

Onde Q é a densidade de carga superficial e d é a separação entre duas camadas de cargas superficiais.

O Movimento das partículas irá assumir a forma:

$$\mu_P = \epsilon' \zeta / 6 \pi \eta$$

O envolvimento das partículas no processo de condução em óleo minerais isolantes não polares é mais interessante, visto que este possui importantes ramificações práticas.

Por exemplo, é sabido que na presença de partículas de cobre, o óleo mineral isolante apresenta elevados valores de $\tan\delta$. Essas partículas originam-se das superfícies dos condutores de cobre, que devem estar imersos no óleo ou das partículas depositadas sobre as fibras de papel Kraft.

Algumas partículas que causam o aumento dos valores de $\tan\delta$ podem estar semiconduzindo como carbono, ou melhor, em óleos com enxofre corrosivo elas devem ser compostas de sulfeto de cobre. Essas partículas encontradas são formadas devido a reação entre o enxofre corrosivo em óleos minerais isolantes e os condutores de cobre.

As partículas de sulfeto de cobre semicondutoras são conhecidas por migrar da superfície do condutor de cobre para o papel impregnado de óleo, resultando numa maior perda dielétrica no papel, culminando eventualmente em instabilidade de temperatura e ruptura dielétrica do óleo isolante impregnado neste papel.

O mesmo mecanismo prevalece no caso das partículas condutivas do cobre elementar, que são observadas por se depositarem nas superfícies do papel Kraft. O cobre condutivo macroscópico e as partículas de sulfeto de cobre semicondutoras adquirem carga na superfície do condutor de cobre energizado, o que faz movimentar no campo elétrico, fazendo com que eles se depositem na superfície do papel impregnado de óleo.

Essas partículas macroscópicas carregadas se propagam rapidamente através de estruturas fibrosas relativamente abertas do papel Kraft e depositam-se também no interior das camadas subsequentes do mesmo papel.

Como consequência, as perdas dielétricas de papéis impregnados com óleo contaminado, com depósitos de sulfeto de cobre semicondutor e do cobre condutivo aumentam com o passar do tempo, provocando a instabilidade térmica e eventuais rupturas dielétricas do sistema de isolamento das bobinas do transformador.

A esta altura do estudo cabe ressaltar mais uma vez que todos os parâmetros medidos, tanto em transformadores falhados como os que ainda continuavam em operação, apesar de deteriorados, estavam dentro da faixa de confiabilidade operativa. Ainda se perguntava o que estava levando estes transformadores à falha.

IV. IMPLICAÇÕES EXTERNAS E DE SISTEMA.

Tornou-se necessário o estudo do sistema elétrico no qual os transformadores estão inseridos, para determinar a real contribuição de transitórios externos aos transformadores, tanto em forma como em intensidade. Foram adquiridos equipamentos de medição destas grandezas e instaladas na subestação e na usina, de modo a registrar estas ocorrências. Os equipamentos foram calibrados com sensibilidade adequada para registro de ocorrências até agora despercebidas.

No estudo do histórico de ocorrências, verificou-se que foram observadas em certas ocasiões e durante pequenos períodos, que as máquinas geradoras produziam um ruído

estranho e bastante diferente do usual em operação. Algumas vezes durante a manifestação desses ruídos, percebiam-se clarões na casa de máquinas, porém não era possível determinar de onde ou de qual máquina os mesmos se originavam.

Quando das ocorrências de falha com os dois transformadores elevadores de Lajeado, foi percebido instantes antes das mesmas, esse ruído diferente e bastante forte nas máquinas geradoras, com expressivo aumento da geração de gases CO e CO₂, e logo a seguir ocorreram as falhas nos transformadores.



Figura 11. Equipe mista de pesquisadores da concessionária e da executante

Visando buscar explicações para essas manifestações, foram propostas alterações neste projeto de P&D que possibilitassem estudar e averiguar possíveis implicações internas ou mesmo ocorrências de sistema que pudessem estar originando tais sintomas e até mesmo originando ou proporcionando condições para que o processo de falha dos transformadores se estabelecesse, compondo definitivamente o que chamaremos de gatilho da falha.

Para tal foi montado um sistema dotado de sensores de vibração instalados nos geradores e de registradores de perturbação na Usina e na subestação 230/500 KV, avaliando correntes, tensões, harmônicos, etc., para a supervisão, registro e análise de transitórios e aspectos dos eventos.

Os registradores de perturbação tiveram seus horários ajustados para atuações simultâneas por dispositivo GPS e qualquer oscilação excessiva, vibrações acima das normais, presença de harmônicos de certa ordem, partidas de proteções, ocorrências no sistema ou mesmo internas, etc., partiam os registradores que imprimiam os registros de todos os eventos monitorados ocorridos naquele instante.

Apesar de já instalados os registradores e alguns sensores necessários, alguns dos eventos previstos para supervisão ainda não puderam ter seus dispositivos de tomada de informações conectados, pois dependem de paradas de máquinas ou mesmo de desligamentos de LTs para a conexão.

Mesmo assim já houve algumas ocorrências de sistema que partiram os registradores, mas nas análises verificou-se que tais ocorrências estavam afetas ao sistema elétrico e não originaram alterações para os eventos supervisionados das máquinas.

Está em análise a falha ocorrida recentemente com o transformador de excitação da máquina 05, para verificar se é possível identificar outras possíveis implicações que levariam também à falha do gerador.

Espera-se com a extensão do período de observação e registro destas ocorrências por mais seis meses, juntar-se evidências no sentido da contribuição do sistema para o referido gatilho.

V. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

1) A aplicação das instruções do manual de Procedimentos de Design Review para Especificação e Comissionamento de Transformadores e Reatores é inédita no país e possibilita maior segurança ao comprador desses equipamentos, com relação à adequação do produto adquirido às suas reais necessidades e a garantias de funcionamento estabelecidas pelo fabricante. Possibilita também identificar em conjunto com o fabricante, pontos fracos ou eventuais problemas de projeto antes da fabricação, de modo a proporcionar maior confiabilidade aos equipamentos quando em operação. A aplicação dos procedimentos do manual é própria para equipamentos que se encontram em processo de aquisição, visto que permitem moldar as características dos mesmos exatamente conforme as necessidades previstas para seu regime de trabalho ou condições específicas do local de instalação.

Equipamentos adquiridos em acordo com os procedimentos desse manual possibilitam aplicação de Revisão ou Análise de Projeto a qualquer tempo, seja para atualização no equipamento, proposição de melhorias, avaliação de condições que ofereçam riscos ou mesmo para análise de situações ou falhas não previstas; visto que de posse dos dados e informações levantadas no transcórre do processo de aquisição, qualquer outro fabricante desse tipo de equipamento ou empresa especializada em procedimentos de Design Review, tem condições de efetuar o estudo e análise pretendidos.

No manual foi introduzida uma tabela que relaciona os principais dados e informações necessários para viabilizar um estudo de Análise e Revisão de Projeto desses equipamentos. Dessa forma, mesmo equipamentos que não tenham sido adquiridos segundo esses procedimentos, podem ser avaliados e estudados com aplicação de conceitos de Design Review, desde que todos os dados e informações necessários citados na tabela, sejam possíveis de ser disponibilizados para tais equipamentos.

2) É grande a importância das medidas de $\tan\delta$ em óleo mineral isolante utilizado em transformadores de potência. É através da relação entre $\tan\delta$ e condutividade que muita in-

formação e discernimento podem ser obtidos através do comportamento das perdas dielétricas de óleos e portadores de carga contidos no óleo os quais determinam a magnitude e o comportamento dessas perdas.

Foi mostrado que os principais mecanismos que afetam a perda dielétrica de óleos minerais em campos elétricos moderados são aqueles que envolvem portadores de carga iônica e macroscópica.

A condutividade induzida nas partículas e a perda dielétrica são de especial interesse e preocupação em transformadores isolados a óleo, contendo enxofre corrosivo.

Salientou-se que, em óleos minerais contendo enxofre corrosivo, partículas macroscópicas de cobre e sulfeto de cobre, após adquirirem carga na superfície dos condutores de cobre energizados, se tornam partículas móveis na presença de um campo elétrico, tendendo a se depositarem na superfície do meio isolante papel-óleo, aumentando assim, de forma significativa as perdas dielétricas deste meio. Descobriu-se que este fenômeno leva a instabilidade térmica no sistema isolante dos transformadores imersos em óleo, culminando eventualmente em rupturas dielétricas.

3) Faz-se necessário a extensão da observação e registro de ocorrências de transitórios no sistema elétrico no qual os transformadores estão inseridos. Recomendamos que o resultado da análise deste banco de dados complemente o estudo aqui encerrado.

4) O foco do projeto, seguindo a metodologia proposta foi amplamente alcançado.

VI. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Victor Sokolov* "Transformer Design Review as a critical step of Life Assessment", TechCon@ 2003 Asia-Pacific
- [2] Ray Bartnikas, "Mecanismo de Perdas Dielétricas em Transformadores Isolados a Óleo", IEC TC 10 Chairman Hydro-Quebec Institute Of Research (IREQ) Verennes, Quebec J3X 1S1 CANADA
- [3] "GUIDE for Life Management Techniques For Power Transformers". CIGRE WG 12-18
- [4] Grigorov I.B.. "Magnetic flux in a core of Large Power Transformers considering stray flux effect", Electrotechnika, 1975, #4, Moscow, "Energia" (In Russian)
- [5] T. V. Oommen, R. S. Girgis, and R. A. Ronnau, "Hydrogen generation from some oil- immersed cores of large power transformers". Proceedings of the Sixty-Fifth Annual International Conference of Doble Clients, 1998, Sec. 8-8
- [6] Victor Sokolov*, Jose Mak*, Dave Hanson, "Risk Assessment Considerations", Proceedings of the TechCon Asia-Pacific, 2002, Melbourne
- [7] Victor Sokolov*, Victor Renev, Eugene Dudkin, Anatoly Mostovschikov "Experience with life management of 750 kV 750 kV GSU transformers at the 1000 MW units of Zaporozhskaya Nuclear Power Plant», Proceedings of the Sixty-Fifth Annual International Conference of Doble Clients, 1998, Sec. 8-11
- [8] Victor V. Sokolov* and Valery Shkrum, "Experience with life assessment and refurbishment of 400 kV shunt reactors", Proceedings of the Sixty-Fourth Annual International Conference of Doble Clients, 1997, Sec 8-7
- [9] Bolduc L., Picher P., Pare G., Demers R., Blanger J. "Detection of Transformer Winding Displacement by the Frequency Response of Stray Losses (FRSL)", CIGRE Paper 12/33-02, 2000

- [10] Ryzhenko V., Sokolov V*., "Effect of moisture on Dielectric Strength of minor insulation of *Power Transformer winding*", Electrical Stations, 1981,#9 (In Russian)
- [11] Francisco de Assis Filho, Edson Ueti, Alexandre Neves da Silva, Márcio Antônio Sens, "Investigação sobre o enxofre corrosivo e seus efeitos sobre as propriedades dielétricas do papel isolante utilizado em equipamentos elétricos", CEPEL – Centro de Pesquisas de Energia Elétrica), 2009 XX SNPTEE Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica
- [12] Alexandre Rios Martins, 1, Alzete Martins Quadros 2, Nádia Maribel Mayer 1, Silas Batista Gomes Jr, "Processo para remoção de DBDS do óleo isolante utilizando adsorventes seletivos a base de alumina ativada", 2009 XX SNPTEE Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica
- [13] Claudio A. Galdeano*, Milton Marques da Silva Junior, José Henrique C. Hossri, Alexandre Teixeira de Souza Machado, "Tratamento para Retirada Online de Dibenzildisulfeto (Dbds) em Transformadores de Potência com Óleo Mineral Isolante com Enxofre Corrosivo". 2009 XX SNPTEE Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica
- [14] Alexandre Neves Eliane Guerra, Luiz Alberto F. da Silva Francisco de A. Filho, "Eficiência da Passivação do Óleo Mineral Isolante Contendo com Postos de Enxofre na Forma Corrosiva", XX SNPTEE Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica

*Pesquisadores neste projeto



Figura 3. Estrutura utilizada para os procedimentos de desmontagem.