

UTILIZAÇÃO DA DESPOLARIZAÇÃO SELETIVA COMO FORMA PRINCIPAL DE ELIMINAÇÃO DO ENXOFRE CORROSIVO DE ÓLEO ISOLANTE NOS TRANSFORMADORES DE ALTA TENSÃO: UM ESTUDO DE CASO

USE OF SELECTIVE DEPOLARIZATION AS MAIN ALTERNATIVE FOR CORROSIVE SULPHUR REMOVAL IN INSULATION OILS OF HIGH VOLTAGE TRANSFORMERS: A CASE STUDY

SANTOS, Rafael da Fonseca Vieira Justen dos¹
SILVA, Alex de Lima e²

RESUMO: Este trabalho é um estudo de caso acerca da utilização do processo de despolarização seletiva como forma principal de eliminação do enxofre corrosivo presente nos óleos isolantes de transformadores e reatores de alta tensão. O enxofre ataca o cobre dos enrolamentos formando sulfeto de cobre e por ser condutivo, contamina as diversas camadas de papel isolante dos condutores até que a rigidez dielétrica seja superada, havendo curto-circuito entre as espiras e consequentemente a falha do equipamento. Este problema foi verificado em reatores e alguns transformadores elevadores que operam a plena carga. A utilização do processo de despolarização seletiva se mostrou o mais eficaz na remoção dos óleos contaminados.

Palavras-chave: enxofre corrosivo; óleo mineral isolante; falhas em equipamentos; despolarização.

ABSTRACT: This work is a case study about the utilization of selective depolarization process as main alternative for removal of corrosive Sulphur present in insulating oil of high voltage reactors and transformers. The Sulphur strikes the copper in windings leading to formation of copper sulphide and for being conductive, it contaminates several layers of insulating papers of conductors until the dielectric hardness be overcome, leading to short circuit between coil loops and equipment failure. This problem was verified in reactors and some transformers that operate at full load. The utilization of selective depolarization proved to be the best available technique in order to remove the contaminated oils.

Keywords: corrosive Sulphur. Insulating mineral oil. Equipment failure. Depolarization

¹ Graduando em Engenharia Elétrica – Universidade Santa Úrsula – rafael.santos@souusu.com.br

² Doutor em Engenharia Elétrica – Universidade Santa Úrsula – alex.lima@usu.edu.br

1 INTRODUÇÃO

O enxofre corrosivo em óleos minerais isolantes de equipamentos do sistema elétrico de potência, principalmente transformadores e reatores, mostram-se propensos a reagir com condutores de cobre, conforme visualizado na figura 01, resultando na formação de sulfeto de cobre. Este último, que é um composto parcialmente condutor, se difunde nas fitas de papel impregnadas de óleo adjacentes ao condutor, levando à um aumento das perdas dielétricas dentro das fitas. Isso resulta na formação de pontos quentes, onde a instabilidade de temperatura pode, eventualmente, causar subseqüentes falhas no sistema de isolamento. (Scatiggio et al. 2009)

Figura 1 - Corrosão devido ao enxofre corrosivo



Fonte: Do autor

De acordo com Martins (2008), durante os últimos anos um alerta foi gerado, a nível mundial, como consequência de um número significativo de falhas em reatores e em alguns transformadores elevadores que acabaram de entrar em operação em diferentes sistemas de transmissão de energia. Grande parte destas falhas estão relacionadas, comprovadamente, com a presença de enxofre corrosivo no óleo mineral isolante dos equipamentos.

O objetivo deste presente estudo é mostrar a utilização do processo de despolarização seletiva nos equipamentos de alta tensão, como forma principal de descontaminar os óleos impregnados com DBDS, que é o composto principal que é formado nos óleos contaminados e é chamado de Dibenzil Dissulfeto (DBDS). Inicialmente, será feita uma definição de enxofre corrosivo, apresentando generalidades e normas para sua detecção, assim como o seu mecanismo de formação nos enrolamentos dos equipamentos. Serão vistos os processos que podem ser usados para a eliminação do enxofre corrosivo, como a passivação, a troca do óleo e principalmente a despolarização seletiva, que se mostrou o método mais funcional para os equipamentos.

2 DESENVOLVIMENTO

A norma ASTM D 2864 (Standard terminology relating to electrical insulating liquids and gases), define enxofre corrosivo como “enxofre elementar e composto termicamente instável que contêm enxofre em óleo isolante elétrico que pode causar a corrosão de certos metais do equipamento como cobre e prata”.

No trabalho de Maina et al. (2005) relatam que não existe apenas um composto de enxofre corrosivo que é responsável por todos os problemas de enxofre corrosivo que estão presentes em todos os equipamentos elétricos imersos em óleo mineral isolante. Desses, apenas uma pequena fração são corrosivos ou são compostos que degradam de espécies estáveis para reativas. Tal fato, geralmente é baseado em tempo e temperatura. Apenas alguns poucos compostos de enxofre corrosivo já foram identificados, e destes, o Dibenzil Dissulfeto é um deles (DBDS).

De acordo com Tumiatti et al. (2010), o DBDS, apresentou características corrosivas em contato com o cobre das bobinas, causando diversas falhas em transformadores e reatores. Ainda de acordo com Tumiatti et al. (2010), de fato, este óleo com DBDS reagindo com o cobre destes equipamentos elétricos (que possui velocidade de reação química dependente das condições de carga e temperatura do ambiente), degrada a capacidade de isolamento do papel destes equipamentos causando como consequência falhas elétricas entre suas espiras.

2.1 Técnicas de mitigação

Para mitigar o problema do DBDS, as principais tecnologias utilizadas são: a substituição do óleo, o uso de passivadores e o processo de despolarização seletiva. Uma solução mitigadora para o problema da contaminação por DBDS do óleo mineral é a substituição do mesmo, porém, esta não permite a remoção total do DBDS impregnado no papel isolante, demais componentes internos e de resíduos de óleo que permanecem no interior do tanque e do conservador.

Ademais, em alguns casos são necessárias duas trocas do óleo o que implica em altos custos, além de ser mandatória a retirada dos equipamentos de operação por algumas semanas. (Maina et al., 2009). Aqui fica a questão do que fazer com o óleo contaminado retirado e o seu descarte.

2.1.1 Passivadores

Outra solução muito aplicada no Brasil é a adição de passivadores metálicos, como derivados de BTA (Benzotriazol). Essa solução pode ser considerada como uma primeira medida de prevenção para mitigar os efeitos negativos do DBDS no cobre. Normalmente, são adicionados cerca de 100 mg/kg de derivados de BTA no óleo isolante. Todavia, o teor dos passivadores cai ao longo do tempo fazendo com que seja necessária a realização de ensaios periódicos e novas adições de passivadores. Cigre WG A2-32 (2006).

Também, verificou-se que no Brasil e em outras partes do mundo diversos reatores de EAT falharam após a passivação. No Brasil, ao menos 6 reatores falharam após um ano em uso nos anos de 2005 e 2006 mesmo sendo passivados. Fato que não se observou em equipamentos que tiveram o óleo substituído. Dessa forma, não há relatos no Brasil de equipamentos contaminados que falharam após a substituição total do óleo isolante. O uso de passivadores metálicos também causa outros efeitos negativos, conforme relatado pelo grupo do CIGRÈ WG A2-32 (2006) e também discutido pelo IEC. Dentre os efeitos negativos do passivador está a produção anômala de gases (hidrogênio, monóxido de carbono e dióxido de carbono), que dificulta o diagnóstico do problema e sua eventual solução.

2.1.2 Despolarização Seletiva

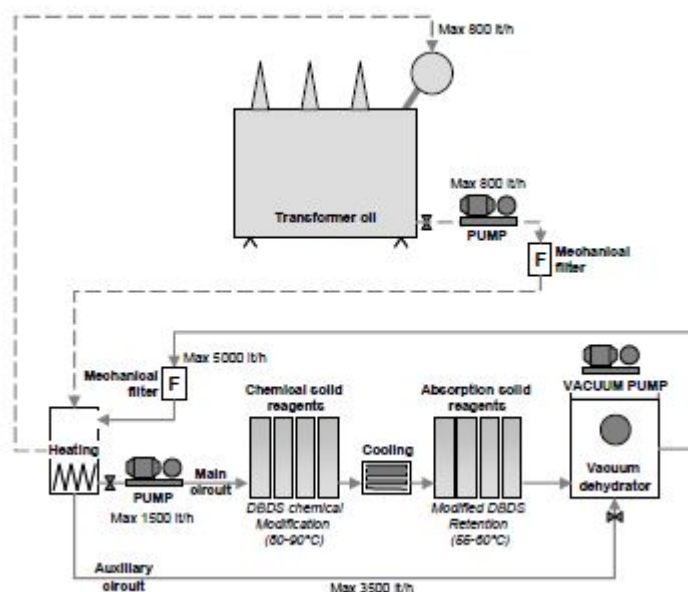
De acordo com Tumiatto et al. (2010), o processo de despolarização seletiva empregado foi patenteado pela empresa italiana Sea Marconi. Atualmente, é um processo conhecido, aplicado em diversas partes do mundo e no Brasil em empresas de transmissão de energia, e que consegue neutralizar o risco associado à existência de DBDS e de outros compostos corrosivos, eliminando a sua presença no óleo.

O processo já foi aplicado em transformadores e reatores de empresas de Transmissão com tensão nominal de até 500 kV, podendo ser mantido o equipamento elétrico em serviço, em condição de carregamento nominal (OLT – On Load Treatment) utilizando métodos operacionais e equipamentos de segurança específicos, conforme mostra a Figura 02.

Do ponto de vista químico, o processo é baseado numa percolação pela pressão do óleo através de reagentes químicos sólidos adequados para aumentar a polaridade dos compostos indesejáveis (DBDS) por modificação química; os compostos modificados são então removidos por adsorção. O processo de despolarização seletiva pode ser aplicado nos equipamentos contendo DBDS no óleo isolante, tanto com eles desenergizados quanto energizados. De fato,

essa última possibilidade torna esse método de tratamento particularmente atraente, minimizando a indisponibilidade dos ativos de transmissão e é escolhido em função da importância do equipamento para o sistema e do valor da multa por indisponibilidade. (Tumiatti et al. 2010).

Figura 2 – Esquema de despolarização seletiva com carga ligada



Fonte: Tumiatti *et al.* (2010)

a. Condições operativas das linhas de transmissão

O mecanismo de falha dos transformadores e reatores afetados por este processo se inicia pela formação de depósitos de sulfeto de cobre no papel dos enrolamentos. Sendo o sulfeto de cobre um material semicondutor, a rigidez dielétrica do papel é reduzida. Portanto, é muito provável que a falha ocorra no momento em que o isolamento dos enrolamentos não consiga mais suportar esta maior solicitação a qual está sendo submetido. Nas linhas de transmissão ocorrem manobras frequentes provocadas por defeitos ou operações indevidas, podendo originar transitórios que, nessas situações adversas, um enrolamento não suportaria, principalmente sob condições desfavoráveis de operação em alta temperatura.

Um exemplo desta situação foi encontrado no Brasil, sem dúvida o país mais afetado por falhas relacionadas com o enxofre corrosivo.

3 ESTUDO DE CASO

Para avaliar a utilização do processo de despolarização seletiva, foi estudado um tratamento de um Autotransformador de 500/230 kV e 200 MVA de uma Transmissora de Energia que está localizado na subestação de Sapeaçu (Bahia).

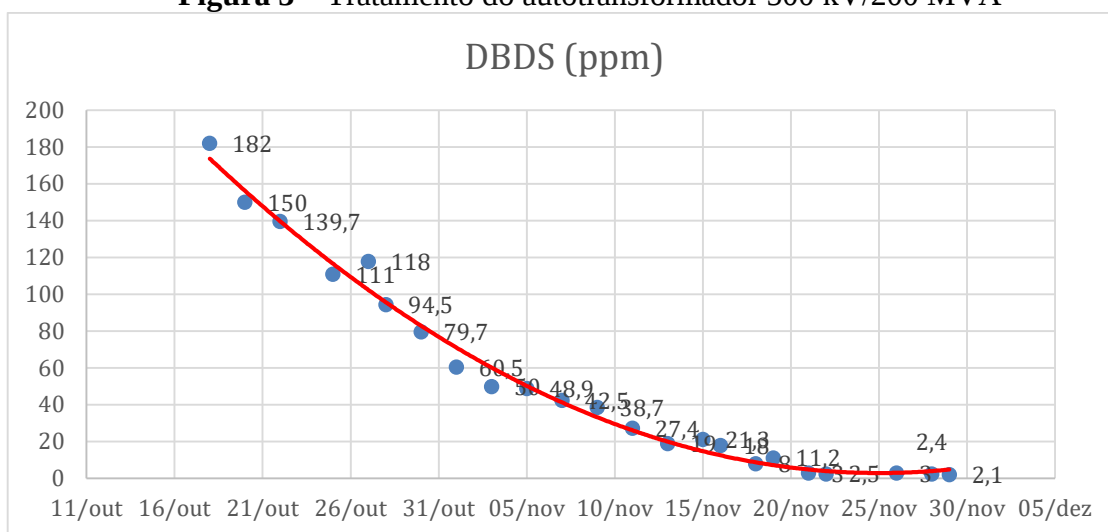
A escolha desse autotransformador está relacionada à sua grande quantidade de óleo (89000 Litros) e a tensão de operação (500 kV), visto que o processo empregado é de conhecida eficiência em equipamentos de menor porte existentes na Europa. Ressalta-se que os principais equipamentos contaminados no Brasil são semelhantes ao escolhido. Apesar de não ter havido falha neste equipamento, nos ensaios químicos de rotina foi detectada a presença de contaminação (DBDS) no óleo isolante dele. O óleo isolante deste equipamento já havia sido passivado.

O processo de despolarização do autotransformador teve duração de 36 dias. O tratamento permitiu reduzir o conteúdo do DBDS no óleo de 182 ppm para menos de 5 ppm. Após a despolarização do óleo, o mesmo passou pelo processo de aditivação e repouso por alguns dias.

O processo foi realizado com o autotransformador energizado e utilizando o buffer, que é uma unidade especial que é colocado entre o equipamento e a unidade móvel de despolarização. A sua função é a necessidade de evitar turbulências no óleo isolante do equipamento em operação.

Na figura 3 é demonstrada a queda do DBDS versus os dias de tratamento.

Figura 3 – Tratamento do autotransformador 500 kV/200 MVA



Fonte: Do autor

Após cerca de 1 ano, o teor de DBDS no óleo mineral isolante do autotransformador permaneceu praticamente inalterado ($\leq 10\text{ppm}$). Esse resultado foi também confirmado com o ensaio após 4 meses do fim do tratamento de despolarização seletiva.

Como auxílio para determinação indireta do DBDS nos óleos isolantes contaminados, pode ser utilizado um kit contendo reagentes, produtos químicos e equipamentos de medição baseado na norma IEC 62697-1 Ed .1, Part 1: Test method for quantitative determination of dibenzyl disulfide.

Este método é uma alternativa rápida e válida para substituição das análises de laboratório com cromatógrafo e requer um tempo menor para a obtenção de resultados de teor de DBDS, fator importante na decisão de substituição dos reagentes durante o processo de despolarização. Além de possuir menores custos de investimento, visto que pode ser adquirida apenas uma quantidade de “kits”, de acordo com o número de testes no óleo que serão programados. No início e no fim do processo devem ser realizados os ensaios de DBDS em laboratório, que são conclusivos para se definir o sucesso do tratamento. Abaixo segue uma figura com a utilização do kit mencionado (figura 04):

Figura 4 – KIT TCS – Avaliação rápida de DBDS



Fonte: Do autor

4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O problema do enxofre corrosivo presente nos óleos isolantes de equipamentos de extra alta tensão se mostrou bastante preocupante para as empresas de transmissão de energia visto que ocorreram diversas falhas nos equipamentos por esse motivo.

As formas de mitigação e reparação da presença do enxofre corrosivo, através do Dibenzil Dissulfeto (DBDS), são necessárias conforme exposto neste estudo. A primeira delas, a troca total do óleo, é solução mais simples para resolver o problema da contaminação por DBDS do óleo mineral, porém, às vezes, esta não permite a remoção total do DBDS impregnado no papel isolante (20%-30%). Ademais, em alguns casos são necessárias duas trocas do óleo o que implica em altos custos, questões ambientais, além de ser necessária a retirada dos equipamentos de operação por algumas semanas.

Outra solução possível para o problema do DBDS é a adição de passivadores metálicos, como derivados de BTA (Benzotriazol). Essa solução pode ser considerada como uma primeira medida de prevenção para frear os efeitos negativos do DBDS no cobre. Mas a passivação traz efeitos negativos e não evitam as falhas por óleo contaminado. Uma delas é a produção anômala de gases (Hidrogenio, monóxido de carbono e dióxido de carbono).

Dentre as medidas para a solução do problema, o processo de despolarização seletiva introduzido recentemente, se destaca devido à sua particularidade de poder ser realizado em campo, em circuito fechado e contínuo, sem precisar do esvaziamento, nem mesmo parcial, do equipamento, permitindo a recuperação do óleo sem ter que substituí-lo. Além disso, em termos econômicos, o processo de despolarização se mostra menos custoso do que a troca total do óleo.

De fato, a troca do óleo especialmente quando falamos de milhares de toneladas de óleo, produz um grande volume de resíduo a ser descartado, enquanto o processo de despolarização seletiva se destaca devido à sua particularidade de poder ser realizado em circuito fechado e contínuo, sem precisar do esvaziamento, nem mesmo parcial, do equipamento, permitindo a recuperação do óleo sem ter que substituí-lo.

Também, a simples aplicação de passivadores (BTA) pode causar problemas ambientais no futuro e, ao final de sua vida útil, deve-se descartar os resíduos deste óleo aditivado.

O entendimento hoje, mesmo que parcial do problema, já nos permite utilizar óleos isolantes novos sem características de corrosividade de acordo com as normas ASTM D 1275-B e NBR 10505, limitando o problema às unidades já identificadas.

REFERÊNCIAS

ASTM. **Standard terminology relating to electrical insulating liquids and gases.** Norma ASTM D 2864.

ASTM. **Standard Test Method for Corrosive Sulfur in Electrical Insulating Oils.** Norma ASTM D 1275.

EECKHOUDT, S.; PETEGHEM, J. Van. and KINABLE. L. **Corrosive sulphur in transformer oils: impact on maintenance strategy and transformer asset management and current research within the Belgian power industry**. Proceedings of CIGRE SC A2 & D1 – Coloquium, Brugges, Bélgica.

LEWAND, L.R. **A Summary of Current Knowledge on Corrosive Sulfur**. IX Conferência Doble no Brasil – Rio de Janeiro – Setembro de 2008.

LEWAND, L.R. **Corrosive sulfur in oils and transformers; why it is such a problem**. IEEE PES Transformers Committee, Memphis 2004.

MAINA, R. et al. **Dibenzyl disulfide (DBDS) as corrosive sulfur contaminant in used and unused mineral insulating oils**. CIGRE A2.32 Internal Working Document. Disponível em <http://www.cigre-a2.org/Site/Publications/paws.asp>.

MAINA, R; TUMIATTI, V.; POMPILI, M. and BARTINIKAS, R. **Corrosive sulfur effects in transformer oils and remedial procedures**. IEEE Vol. 6, N. 6 – 2009.

MARTINS, Amanda A.G. **Falhas catastróficas em transformadores provocadas pelo sulfureto de cobre. Causas e soluções**. Ciência & Tecnologia dos Materiais, Vol. 20, n.º 3/4, 2008

ONS. **Operador Nacional do Sistema Elétrico**. Disponível em www.ons.org.br.

SCATIGGIO, F.; POMPILI, M. and BARTINIKAS, R. **Effects of Metal Deactivator Concentration upon the Gassing Characteristic of Transformer Oils**. IEEE Transaction USA, 2010.

SCATIGGIO, F.; MAINA, R; TUMIATTI, V.; POMPILI, M. and BARTINIKAS, R. **Corrosive sulfur induced fail-ures in oil-filled electrical power transformers and shunt reactors**. IEEE Transformation. on Power Delivery, Julho 2009.

TUMIATTI, Vander. et. al. **DBDS & Corrosion free programe 2010: Diagnosis and countermeasures – Quantitative determination and selective depolarization**. 2010