



Secagem de Enrolamentos de Transformador de Potência Energizado com Sistema Automatizado de Peneira Molecular Reciclável

**Aparecido R. Coutinho¹ Claudio A. Galdeano² Armando Bassetto F.²
José Henrique H.C. Hossri² José D. Eurico³**

¹Universidade Metodista de Piracicaba

²MGM Trafos

³Elektro

Brasil

RESUMO

Este artigo apresenta novo sistema de secagem do isolamento sólido de transformadores de potência energizados por meio de filtros de peneira molecular reciclável. O sistema de secagem possui sensores de monitoramento do teor de água do óleo tanto da entrada quanto da saída, o que permite quantificar a água retirada do óleo. Os dados apresentados demonstram os resultados positivos obtidos na aplicação do sistema de secagem em transformadores energizados.

PALAVRAS-CHAVES

Transformador de potência, isolamento sólido, secagem, peneira molecular, reciclagem

1 INTRODUÇÃO

O isolamento sólido de transformadores de potência é seco no processo de fabricação até que seu teor de umidade atinja valores em torno de 0,5%. Desde a entrada em operação do transformador, o teor de água do papel isolante aumenta continuamente. Existem duas causas principais que contribuem para o aumento do teor de água do papel:

- Contaminação com umidade atmosférica
- Degradação do papel e do óleo

O óleo isolante é o meio de transferência de umidade no transformador. Embora a água esteja normalmente dissolvida no óleo, esta também pode ser adsorvida na superfície de partículas sólidas como as fibras de celulose. Tanto a concentração de produtos polares de oxidação do óleo quanto a solubilidade da água aumentam, à medida que o óleo envelhece. O equilíbrio termodinâmico entre a água adsorvida na celulose e a água dissolvida no óleo é favorecido, desde que a temperatura do óleo seja mantida alta o maior tempo possível.



Pequenos aumentos ou diminuições de temperatura podem alterar o teor de água do óleo, mas têm pouco efeito no teor de água do papel, onde fica retida a maior parte da umidade. O Grupo de Trabalho A2-30 do CIGRÉ [1] fez um estudo muito interessante sobre umidade em sistemas isolantes de transformadores, que deverá ser publicado em breve.

2 AVALIAÇÃO DE UMIDADE

A solubilidade da água no óleo isolante depende tanto da temperatura quanto do nível de oxidação do óleo. A tabela 1 mostra resultados de ensaio obtidos por três estudos de laboratório [2-4] e dados apresentados no Guia IEC 60422 [5], que compara a solubilidade de um óleo novo com 0,03 mg KOH/g de acidez e de um óleo oxidado com 0,30 mg KOH/g de acidez.

Alguns autores [2-3, 6] propuseram os diagramas de equilíbrio que correlacionam o teor de água do óleo (ppm) com o teor de água do isolamento de papel (%). A tabela 2 mostra os resultados obtidos em três estudos de laboratório.

Tabela 1: Solubilidade da água no óleo segundo algumas referências [2-5]

TEMPERATURA (°C)	TEOR DE ÁGUA DO ÓLEO (PPM)				
	Oommen [2]	Griffin [3]	Shell [4]	IEC 60422 [5]	
				Óleo Novo	Óleo Oxidado
20	53	56	55	55	70
30	82	83	84	82	118
40	122	122	124	120	200
50	179	174	180	172	-

Tabela 2: Teor de água do isolamento de papel de acordo com os diagramas de equilíbrio propostos por diferentes autores [2-3, 6]

Teor de Água do Óleo/ Temperatura	TEOR DE ÁGUA DO ISOLAMENTO DE PAPEL (%)		
	Oommen [2]	Griffin [3]	Fabre e Pichon [6]
10 ppm 30°C	3,1%	4,0%	3,4%
10 ppm 70°C	1,0%	1,0%	1,1%
60 ppm 60°C	2,9%	5,0%	4,5%
80 ppm 70°C	2,7%	3,8%	3,8%

O teor de água do isolamento de papel pode ser estimado por meio de diagramas de equilíbrio. Por exemplo, um transformador com 10.000 litros de óleo com densidade (20/4°C) igual a 0,88 terá massa correspondente a 8.800 kg de óleo. Numa estimativa simplificada, a massa de papel corresponde a 10% da massa de óleo, que neste caso é de 880 kg de papel. Pode-se obter a temperatura média, somando a temperatura do topo de óleo e a da amostra retirada do registro inferior do tanque do transformador e dividindo a soma por dois. Se a temperatura média do óleo for de 45°C e o teor de água do óleo for 40 ppm, o teor de água do papel é de 3,5%, de acordo com o diagrama de equilíbrio publicado por Fabre e Pichon [6]. Isto significa que o isolamento de papel do exemplo tem cerca de 30,8 litros de água. A fim de reduzir o teor de água do isolamento para 2%, terão que ser retirados 13,2 litros de água. Após a conclusão do processo de secagem, o teor de água do óleo deverá ser 18 ppm à temperatura de referência de 45°C.

A utilização de diagramas de equilíbrio é válida apenas em condições de equilíbrio. Dependendo da temperatura, pode-se atingir o equilíbrio após semanas ou meses. Como isso é muito difícil de ser obtido em condições reais de campo, os autores desenvolveram seu próprio método para cálculo do teor de água do papel com base no teor de água do óleo (ppm), na saturação relativa da água no óleo (%) e na temperatura do óleo, fornecidos por sensores automáticos de coleta de dados [7].

3 SISTEMA DE SECAGEM AUTOMATIZADA

A retirada de umidade de transformadores é feita por meio do óleo isolante e a conseqüente migração da umidade do papel para o óleo. Este processo depende da temperatura. O tempo de difusão está associado a vários fatores, tais como: tipo do óleo, espessura do isolamento de papel, sistema de resfriamento do óleo, nível de oxidação do óleo e temperatura. Existem vários sistemas de secagem de papel para uso em campo. Todos eles empregam o método de retirada de umidade do óleo e a conseqüente redistribuição da umidade no papel isolante.

A retirada de umidade do óleo isolante através de peneiras moleculares é um processo muito eficaz. Entretanto, as peneiras moleculares disponíveis no mercado brasileiro não são recicláveis. Os autores desenvolveram peneiras moleculares produzidas a partir de materiais cerâmicos e carbônicos com base na literatura [8]. Também se projetou sistema de secagem totalmente automatizado, empregando os materiais adsorventes desenvolvidos. Conecta-se o sistema de secagem (figura 1) ao registro inferior do tanque principal, o óleo é bombeado através do sistema de filtros e de volta ao transformador pelo registro do fundo do tanque de expansão. As válvulas do sistema são controladas automaticamente, a fim de evitar quaisquer vazamentos de óleo. O sistema monitora tanto os parâmetros de entrada quanto de saída do óleo, tais como: temperatura ($^{\circ}\text{C}$), teor de água (ppm) e saturação relativa da água (%). A figura 2 mostra o painel de controle. Finalmente, os dados coletados são enviados remotamente ao centro de operação do sistema. Esses dados também podem acessados por telefone celular (figura 3).

Figura 1: Sistema de secagem instalado em transformador de potência energizado



Figura 2: Vista dos sensores do sistema de secagem e do painel de controle



Figura 3: Diagrama esquemático do sistema de processamento de dados do sistema de secagem



Em 26 de maio de 2006, instalou-se o sistema no campo para secar o isolamento de papel de um transformador com tanque de expansão equipado com filtro de sílica-gel, 138-13,8 kV, 18,75 MVA, 18.700 litros de óleo, fabricado em 1971. Em 9 de setembro de 2006, o processo de secagem terminou. Foram retirados 18,6 litros de água. A tabela 3 apresenta o teor de água estimado do papel com base no método de cálculo desenvolvido pelos autores [7].

**Tabela 3: Teor de água estimado do isolamento de papel**

Data	Teor de água do óleo (ppm)	Teor de água estimado do papel (%)
8 de julho de 2005	15	3,0
10 de setembro de 2006	4	1,2
5 de abril de 2007	6	1,4

A tabela 4 mostra a quantidade de água retirada de 12 transformadores de potência instalados no sistema elétrico da Elektro, cuja área de concessão engloba vários municípios do estado de São Paulo. Como se pode observar na tabela, a quantidade de água retirada variou de 9,14 a 43,80 litros. A operação do sistema de secagem é muito simples, pois seus filtros conseguem reter até 25 litros de água sem necessidade de troca. Também é possível avaliar o desempenho dos filtros pelo monitoramento do teor de água tanto do óleo de entrada quanto daquele de saída. Os transformadores constantes na tabela 4 foram secos entre 2006 e 2007, e seus teores de água têm se mantido aproximadamente no mesmo nível desde então. Isto confirma que seu isolamento de papel foi seco eficazmente.

Tabela 4: Volume de água retirada do óleo de 12 transformadores de potência

NO. DE SÉRIE	CLASSE DE TENSÃO (kV)	POTÊNCIA NOMINAL (MVA)	VOLUME DE ÓLEO (L)	VOLUME DE ÁGUA RETIRADADA (L)
1845	69-13,8	12,5	6.100	27,41
30569	69-13,8	2	2.900	9,14
53093	69-13,8	2	3.874	9,32
7635	88-13,8	12,5	9.600	28,26
53374	138-13,8	12,5	16.300	30,60
8016	88-13,8	9	13.000	24,35
17483	138-13,8	18,75	18.700	21,78
500390	69-13,8	9	5.250	14,90
500138	138-13,8	12,5	11.800	20,78
33396	138-13,8	12,5	12.500	14,07
500372	138-13,8	30	12.950	43,80
55888	138-13,8	18,75	15.000	38,80



Comité Nacional Paraguayo



Unión de Ingenieros de ANDE

VIII SEMINARIO DEL SECTOR ELECTRICO PARAGUAYO - CIGRÉ
29, 30 y 31 de Octubre de 2008

4 CONCLUSÕES

Desenvolveu-se sistema automático de secagem de papel por meio do uso de filtros com peneiras moleculares recicláveis para uso em transformadores energizados. O sistema é muito eficaz para secar o isolamento sólido de transformadores úmidos. O desempenho do sistema de secagem pode ser monitorado automaticamente e acessado remotamente. A operação do sistema é muito simples, pois seus filtros conseguem reter até 25 litros de água sem haver necessidade de troca.

Foram secos 13 transformadores com capacidade nominal entre 2 e 30 MVA, tendo sido retirados destes de 9,14 a 43,80 litros de água. Os transformadores foram secos entre 2006 e 2007, e seus teores de água têm se mantido aproximadamente no mesmo nível desde então. Isto confirma que seu isolamento de papel foi seco eficazmente.

BIBLIOGRAFIA

- [1] CIGRE. Moisture equilibrium and moisture migration within transformer insulation systems, CIGRE WGA A2-20, versão preliminar, set. 2007.
- [2] T.V. Oommen, "Moisture equilibrium in paper – oil systems" (Proceedings of the Electrical/Electronics Insulations Conference, Chicago, IL, 3-6 out. 3-6, 1983, p.162-166).
- [3] P.J.Griffin et al., "Comparison of water equilibrium in silicone and mineral oil transformers", (Minutes of the Fifty-Fifth Annual International Conference of Doble Clients, 1988, sec. 10-9.1).
- [4] Shell Oil Company, Shell Lubricants Bulletin SOC: 39-92.
- [5] CEI/IEC. "Mineral insulating oil in electrical equipment – supervision and maintenance guidance" (CEI/IEC Standard 60422-2005, out. 2005).
- [6] J.Fabre & A. Pichon, "Deteriorating processes and products of paper in oil. Application to transformers"(Proceedings of the 1960 International Conference on Large High Voltage Electric System (CIGRE), paper 137).
- [7] A. Bassetto F. & C.A. Galdeano, Correspondência pessoal, nov. 2007.
- [8] V. Pantic, V. Jovanovic, D. Karaulic, "Insulation system maintenance using molecular adsorption method" (Proceedings of the 1996 International Conference on Large High Voltage Electric System - CIGRE).