

Transformador de Distribuição de Classe 85°C Autoprotegido

Roberto de Vasconcellos Dias, Light – Rio de Janeiro - RJ, Diogo Kataoka, Adelfo Barnabé, Newton José Guaraldo e José Mak – B&M Pesquisa e Desenvolvimento – Campinas – SP.

Resumo – O projeto desenvolveu 3 protótipos de transformadores autoprotegidos, utilizando óleo isolante vegetal, nas configurações de disjuntor no lado AT, disjuntor no lado BT e com disjuntor lado BT externo.

Os três protótipos foram produzidos e submetidos a ensaios de laboratório de AT, ensaios de rotina junto ao fabricante e ensaios de curto-circuito no laboratório da IEE-USP.

Os protótipos foram desenvolvidos utilizando éster natural, como meio isolante, e com possibilidade de operação até 85°C.

Foram construídos 2 protótipos do tipo 1 e dois protótipos do tipo 2 e instalados na rede de distribuição da concessionária.

Palavras-chave – Distribuição, Eficiência Térmica, Transformador, Vida útil.

I. INTRODUÇÃO

Os transformadores da rede de distribuição elétrica constituem a última etapa de transformação necessária para a adequada alimentação das cargas constituídas por residências, comércios, iluminação pública e indústrias.

Apresentam-se instalados normalmente em postes quando a distribuição é aérea ou em poços quando a distribuição é do tipo subterrâneo.

Pela pequena capacidade de transformação adequada ao circuito secundário, torna-se necessário aumentar a quantidade de transformadores para atender a demanda de uma região.

Os transformadores de distribuição aéreos estão instalados normalmente a um nível pouco abaixo do circuito primário de alimentação, estando sujeitos aos surtos atmosféricos incidentes na rede e sobretensões de frequência industrial originadas por curtos-circuitos ou manobras na rede.

Normalmente, os transformadores são protegidos contra surtos atmosféricos através de pára-raios e possuem também chaves fusíveis para proteção contra sobrecorrentes ou curtos-circuitos.

Os pára-raios apresentam boa proteção, porém, estudos estatísticos têm apresentado elevada taxa de falha do mesmo, conseqüentes danos irreversíveis aos transformadores, provocando efetivo aumento de custos e do número de falhas, com conseqüente queda da disponibilidade e qualidade do fornecimento da energia elétrica.

Os elos fusíveis de proteção contra sobrecorrente ou curto-circuito atuam corretamente quando bem coordenados, mas ocasionando longas interrupções indesejáveis. Já transformadores autoprotegido por disjuntores internos tem

apresentado alto custo do componente principal de proteção, o disjuntor, importado e com comando de fácil acesso, levando aos consumidores a bloquearem a alavanca de rearme para impedir a atuação da proteção e conseqüentemente falta de energia.

Afim de solucionar estes problemas, foi desenvolvido projeto, especificação e construção de protótipo de novo dispositivo com o objetivo de proteger o transformador contra sobretensão, de menor rico de falha, custo reduzido e proteções de sobrecorrentes que diminuam o tempo de interrupção de energia.

Existe uma longa faixa de aplicações e configurações de dispositivos para tais fins, entretanto, o artigo procurou focalizar especificamente uma solução mais adequada e orientada para a proteção de transformadores de distribuição aéreos.

II. CARACTERÍSTICAS ELÉTRICAS

Tensão Primária:	13.2 kV
Tensão Secundária:	220/127 Volts
Numero de fases:	3
Nível de Isolamento AT:	15/95 kV
Frequência Industrial:	60 Hz
Potencia:	120 kVA
Grupo de Ligação:	Dyn1
Elevação de Temperatura:	85°C
Impedância Percentual:	3,5 ± 7,5%
(referida a 55°C)	

III. APRESENTAÇÃO DOS PROTÓTIPOS

A. Protótipo Tipo 1 (Disjuntor na AT)

- ◆ Para-raio classe 15 kV de instalação externa
- ◆ Fusível de alta-tensão: Modelo ELSP 65 A
- ◆ Interruptor Magnex Trifásico: MX3BN1MDE10
- ◆ Equipamento de sobrecarga incorporado ao interruptor
- ◆ Pára-raios de baixa tensão a ser definido
- ◆ Sinalizador de atuação

B. Protótipo Tipo 2 (Disjuntor na BT)

- ◆ Para-raio classe 15 kV de instalação externa
- ◆ Fusível de alta tensão: Modelo ELSP 65 A
- ◆ Termômetro de óleo, ajustado para desligar o disjuntor de BT
- ◆ Caixa de Fibra acoplada no transformador
- ◆ Disjuntor de baixa tensão
- ◆ Pára-raios de baixa tensão a ser definido

D. SELETIVIDADE DA PROTEÇÃO.

O estudo de seletividade da proteção dos componentes internos ao transformador autoprotegido, com a rede de distribuição da concessionária, levou em consideração defeitos na rede secundária com até 250 metros do transformador. Curtos-circuitos até a bucha secundária do transformador são eliminados pelo disjuntor de AT no arranjo tipo 1 e disjuntor BT no arranjo tipo 2.

No arranjo tipo 2 com disjuntor na BT, foi utilizado disjuntor termomagnético, sendo retirado do mesmo o elemento térmico, ocasionado a abertura do mesmo apenas para curtos-circuitos. Para defeitos externos ao transformador foi instalado sensor de temperatura, dentro do transformador e quando o mesmo atinge uma temperatura pré-estabelecida comanda a abertura do disjuntor termomagnético.

Foram adotado em ambos arranjos pára-raios na baixa tensão com intuito de evitar surtos advindos da baixa tensão.

E. TRAFÓ AUTOPROTEGIDO COM DISJUNTOR NA AT



Foto 1: Protótipo tipo 1 durante ensaio CC

F. TRAFÓ AUTOPROTEGIDO COM DISJUNTOR NA BT



Foto 2: Protótipo tipo 2



Foto 3: Disjuntor de AT



Foto 4: Fusível de AT

IV. ÓLEO VEGETAL

Um fluido isolante biodegradável proveniente de uma fonte de óleo vegetal altamente oléica foi desenvolvido e teve bom desempenho em ensaios de laboratório assim como de vida útil em transformadores de distribuição. Além de alta biodegradabilidade, pontos de fulgor e de inflamação elevados, boa estabilidade a oxidação e durabilidade caracterizam o fluido durante os ensaios de vida útil.

É comparável a fluidos de éster sintético, usados em transformadores de tração. Os produtos de decomposição, sob solicitação térmica e elétrica, deste fluido natural são semelhantes ao óleo tradicional de transformador, exceto pela formação de maiores quantidades de CO e CO₂. Sob condições de arco, apenas um quarto da quantidade total de gás parece ter se formado fora do óleo mineral. Este fluido não é agressivo ao meio ambiente e é uma alternativa ao uso de óleos minerais.

Alguns trabalhos publicados anteriormente demonstraram a praticidade de substituir óleo mineral por fluido dielétrico de éster natural em sistemas de isolamento líquido-papel. Experiências anteriores mostraram diferença nas taxas de envelhecimento de papel em éster natural em relação a papel em óleo mineral.

A característica mais importante usada para avaliar o envelhecimento do transformador é a resistência mecânica do papel isolante. Para determinar as taxas de envelhecimento durante um período prático de tempo, é utilizado o envelhecimento acelerado. De acordo com o Guia de Carregamento do IEEE, o envelhecimento acelerado em sistemas selados simula melhor o verdadeiro envelhecimento em transformadores selados modernos.

O envelhecimento do papel depende basicamente da temperatura e do teor de água. Um dos primeiros estudos de envelhecimento do isolamento relatou uma taxa de envelhecimento térmico exponencial que basicamente dobrava para cada 8°C de elevação de temperatura. Trabalho posterior aplicou a teoria da taxa de reação química ao envelhecimento do papel e refinou as estimativas de taxa. Estudos sobre o teor de água mostram uma taxa de envelhecimento aproximadamente proporcional ao teor de água.

Os resultados da resistência à tração (figura 3) e o grau de polimerização (figura 4) para o papel envelhecido em óleo mineral correspondem àqueles de estudos já publicados [8,9,11,12]. A figura 5 mostra o papel depois de 4000 horas a 150 e 170°C. Visualmente, o papel em éster natural mostrou menos degradação do que o

papel em óleo mineral. A manipulação de rotina de amostras mostrou que papéis envelhecidos em óleo mineral ficaram mais frágeis do que aqueles em óleos de éster.

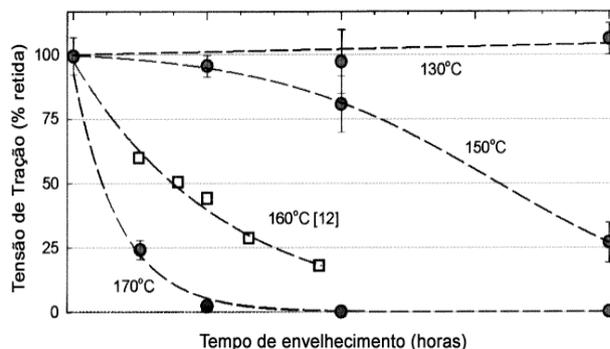


Figura 3 Resistência à tração do papel termoestabilizado envelhecido em óleo mineral (recipientes selados a 130, 150, 170°C). Dados a 160°C incluídos para comparação.

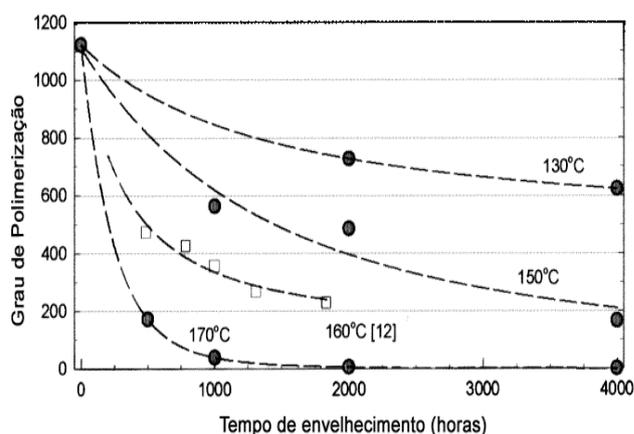


Figura 4: Grau de polimerização do papel termoestabilizado envelhecido em óleo mineral (recipientes selados a 130, 150, 170°C). Dados a 160°C incluídos para comparação.

A temperaturas maiores e tempo mais prolongado, os recipientes contendo óleo mineral tiveram um acúmulo de borra e depósitos de partículas carbonizadas nas paredes. Os recipientes contendo éster natural permaneceram limpos.

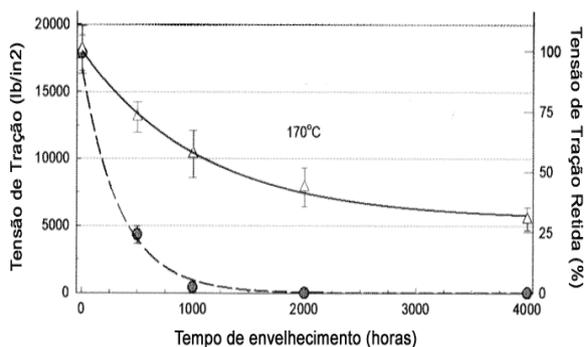


Figura 7: Resistência à tração do papel

termoestabilizado envelhecido em óleo mineral e fluido dielétricos de éster natural (recipientes selados a 170°C).

V- ENSAIOS DE LABORATÓRIOS

Foram executados nos laboratórios do IEE- USP e na fabrica da Itaipu os seguintes ensaios em conformidade com as normas específicas:

- Ensaios de impulso
- Ensaios de Rotina
- Ensaio de curto-circuito
 - Ensaio de defeito interno
 - Ensaio de Coordenação do disjuntor BT
 - Ensaio de Coordenação do disjuntor AT
- Ensaios de Rotina pós Ensaio de C.C

TABELA I

Comparação dos Ensaios de Rotina após C.C

TRAFO AP DISJUNTOR AT (120 kVA)						
TAP	Perdas no Cobre 75°C			Impedância 75°C %		
	Antes CC	Pós CC	Var. %	Antes CC	Pós CC	Var. %
13800	1738	1712	-1,5	3,79	3,79	0
13200	1785	1752	-1,85	3,82	3,81	-0,26
12600	1824	1796	-1,54	3,82	3,81	-0,26

TABELA II

Comparação dos Ensaios de Rotina após C.C

TRAFO AP DISJUNTOR BT (120 kVA)						
TAP	Perdas no Cobre 75°C			Impedância 75°C %		
	Antes CC	Pós CC	Var. %	Antes CC	Pós CC	Var. %
13800	1770	1765	-0,28	3,82	3,81	-0,26
13200	1807	1800	-0,39	3,84	3,82	-0,52
12600	1853	1848	-0,27	3,84	3,83	-0,26

Os ensaios realizados apresentam nenhuma anomalia nos transformadores autoprotetidos após os ensaios de curto-circuito.

VI. VIABILIDADE ECONÔMICA

No estudo de viabilidade econômica foi levado em consideração os seguintes documentos e parâmetros:

- ↳ Documento Técnico CODI 19.35 de 21/08/98;
- ↳ Documento Téc. CODI 3.2.18.16.0 de 11/94;
- ↳ Resolução Homologatória N° 391 de 6/11/06;
- ↳ Período de Capitalização: $n = 20$ anos;
- ↳ Taxa anual de atualização: $i = 12\%$ ao ano;

- ↳ Fator de carga: $F_c = 0,55$;
- ↳ Constante: $a = 0,15$.

O estudo demonstrou a viabilidade econômica dos dois protótipos construídos em relação ao transformador convencional e demais acessórios associados.

Durante o estudo da viabilidade econômica avaliou-se que alguns pontos que podem melhorar o desempenho econômico dos transformadores construídos:

- ↳ A instalação deste tipo de transformadores em áreas de sazonalidade de carga, ou seja, aonde grande parte do ano (aproximadamente 8 meses) com carregamento baixo e os demais meses com carregamento acima da nominal. Este comportamento de carga se verifica principalmente em regiões de veraneio. O fator de carga nestas regiões é bem inferior a 0,55 adotado no estudo de viabilidade, o que torna este tipo de transformador mais adequado.
- ↳ Reprojetado do núcleo do transformador utilizando chapa de aço silício M4 com corte especial, reduzindo assim as perdas a vazio do mesmo e conseqüentemente melhorando o desempenho econômico deste transformador em regiões de veraneio;
- ↳ Redução do custo do transformador em função da substituição do fusível interno por fusível externo e conseqüentemente redução da carcaça do transformador;
- ↳ Redução do custo do transformador em função do mesmo entrar na linha de produção industrial (ganho em escala).

VII. Conclusões

A avaliação geral dos resultados desse Projeto, elaborada em conjunto entre a equipe executante e a contratante possibilitou concluir que os transformadores desenvolvidos demonstram desempenhos satisfatórios tanto tecnicamente como economicamente.

O estágio de desenvolvimento atingido pelos protótipos possibilita dar prosseguimento ao projeto evoluindo o protótipo tipo 1 para cabeça de série, através de um futuro projeto de P&D.

- Melhoria do índice de qualidade de fornecimento (DEC/FEC/DIC/FIC);
- Possibilidade de maior carregamento;
- Maior confiabilidade;

□ Ecologicamente correto, não contaminando meio ambiente.



Foto 5: Foto da instalação do equipamento na rede de distribuição

VIII. REFERÊNCIAS

- [1] **BARSCH, A. J.; KOLCIO, N.** - "Power Frequency AC Sparkover Voltage Measurements of Small Air Gaps" - IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 14, N° 3, July 1999.
- [2] **HIZIROGLU, H. R.; SEBO, S. A.** - "Calculation of Breakdown Voltages of Short Air Gaps" - IEEE 2000 Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena.
- [3] **ELLIS, F. M. et al.** - "Low Breakdown Probabilities in Short Air Gaps" - Proceedings of the 4th International Conference on Properties and Applications of Dielectric Materials July 3-8, 1994 Brisbane Australia.
- [4] **ALLEN, N. L. and EL- NAILI, M.** - "Impulse Breakdown of Insulators and Air Gaps of Similar Electrode Configurations" - IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 1 N° 6, December 1994.
- [5] **MICROPOULOS, P. N.; STASSINOPOULOS, C. A.** - "Impulse Breakdown of Short Rod-Plane Gaps and the Influence of Humidity" - IEE Proc. Sci. Meas. Technol. Vol. 145, N° 4, July 1998.
- [6] **GIRALT, M. And BURET, F.** - "Prediction of Breakdown Voltages of Air Gaps : Implementation of a Discharge Nodel Using Electric Field Computation Results" - High Voltage Engineering Symposium, 22-27 August 1999 Conference Publication N° 467, IEE 1999.
- [7] **CHOWDHURI, P.; MISHRA, A. K.; McCONNELL, B. W.** - "Volt-Time Characteristics of Short Air Gaps Under Nonstandard Lightning Voltage Waves" - IEEE Transaction on Power Delivery, Vol. 12, N° 1, January 1997.
- [8] **SHATOH, H.; MORITA, K.; KIKKAWA, T.; KATO, K. and OKUBO, H.** - "Impulse Partial Discharge and Breakdown Characteristics of Road-Plane Gaps in N₂/SF₆ Gas Mixtures" - IEEE 2001 Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena.
- [9] **QURESHI, M. I.; AL-ARAINY, A. A. and MALIK, N. H.** - "Performance of Protective Rod Gaps for Medium Voltage Networks in the Presence of Dust Particles Under Lightning Impulses." - IEEE Transaction on Power Delivery, Vol. 14, N° 4, October 1999.
- [10] **SEBO, S.; KAHLER, J.; HUTCHINSA, S.; MEYERS, C.; OSWIECINSKI, D.; EUSEBIO, A. and QUE, W.** - "Breakdown Voltages of Various Air Gaps in the Presence of Dielectric Sheets (Barriers)." - IEEE 1999 Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena
- [11] **KARSHAW, S. S.; GAIBROIS, G. L. And STUMP, K. B.** - "Applying Metal Oxide Surge Arresters on Distribution Systems" - IEEE Transaction on Power Delivery, Vol. 4, N° 1, January 1989.
- [12] **VIPPIN, P. M.; KISHORE, N. K. and JAYARAM, B. N.** - "Degradation of Metal Oxide Surge Arresters Under Simulated Natural Conditions" - Department of High Voltage Engineering, Indian Institute of Science, Bangalore 560 012.
- [13] **PLATA, A. M.; PONCE, M. A.; RIOS, J. M.; DE LA ROSA, F.; CASTAÑO, V. M.** - "Degradation of ZnO Based Surge Arresters Under Field Conditions" - IEE Proc. Sci. Technol. Vol. 143, N° 3, September 1996.
- [14] **GONZALES, D. A.; KERSHAW, S. S.; VASSILIOU, N.; VOUKELATOS, J.** - "Gapped Metal Oxide Varigap Arrester Technology : Na Innovative Step that Advances Performance Characteristics of Distribution Class Surge Arresters and Improves Surge Protection." - IEEE/NTUA Athens Power Tech Conference: Planning, Operation and Control of Today's Electric Power Systems", Athens, Greece, Sept. 5-8, 1993.
- [15] **HADDAD, A.; FUENTES, J.; GERMAN, D. M.; WATERS, R.T.** - "Characterisation of ZnO Surge Arrester Elements with Direct and Power Frequency Voltages" - IEE Proceedings, Vol. 837, N° 5, September 1996.
- [16] **IMAI, T.; UDAGAWA, T.; ANDO, H.; TANNO, Y.; KAYANO, Y.; KAN, M.** - "Development of High Gradient Zinc Oxide Nonlinear Resistors." - IEEE Transaction on Power Delivery, Vol. 13, N° 4, October 1998.
- [17] **MARDIRA, K. P.; DARVENIZA, M.; SAHA, T. K.** - "Search for New Diagnostics for Metal Oxide Surge Arrester" - Proceedings of The 6th International Conference on Properties and Applications of Dielectric Materials June 21-26, 2000, China.
- [18] **HAN, S. W.; CHO, H. G.; LEE, Y. J.; KANG, H.B.** - "Modeling of Failure of MOV for High-Voltage Arresters by Veronoi Network Simulation" - Proceedings of The 6th International Conference on Properties and

Applications of Dielectric Materials June 21-26, 2000, China.

[19] HE, J. L.; ZENG, R.; TU, Y.P.; HAN, S. W.; CHO H. G. – “Aging Characteristics and Mechanisms of ZnO Nonlinear Varistors” – Proceedings of The 6 th International Conference on Properties and Applications of Dielectric Materials June 21-26, 2000, China.

[20] ANDOH, H.; NISHIWAKI, S.; SUZUKI, H.; BOGGS, S.; KUANG, J. - “Failure Mechanisms and Recent Improvements in ZnO Arrester Elements.” – IEEE Vol. 16, N° 1, January/February 2000.

[21] DARVENIZA, M.; SAHA, T. K. – “Comparisons of In-Service and Laboratory Failure Modes of Metal-Oxide Distribution Surge Arresters.” - IEEE, 2000.

[22] DURBAK, D. W. – “ Surge Arrester Modeling ” - IEEE, 2001.

[23] TSUGE, K. – “ Design and Performance of External Gap Type Line Arrester ” -IEEE, 2002.

[24] SCHMIDT, W.; BRIZZI, M.; GRAMESPACHER, H. – “Towards the Overvoltage Protection by Modern ZnO Surge Arresters ” -IEEE, 2003 Bologna Power Tech Conference, June 23-26, Bologna, Italy.

[25] NARANCIC, V.; BRAUNOVIC, M.; WESTRON, A. C. – “ The Composite Fuse – A New Technology for Current Limiting Fuses ” -7° IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exposition, April 1-6, 1979.

[26] LIPSKI, T. – “Distribution Fuses of Nearest Future ” -Technical University of Gdansk, Poland.

[27] DEGNAN, J. H. – “Analytic Criteria for Fuses for Explosive Flux Compression Generators ” -High Energy Plasma Division Phillips Laboratory Kirtland Air Force Base, New Mexico.

[28] RANJAN, R.; KALKSTEIN, E. W. – “Design, Development and Application of Smart Fuses – Part I ” - IEEE Transaction on Industry Application, Vol. 30, N° 1, January/February 1994.

[29] PFLANZ, H. N.; ACREE, J. A.; SCHAFFER, J. S. – “Development and Testing of Power Assisted Current Limiting Fuses to 600 Amperes and 38 kV. ” -IEEE Transaction on Power Delivery, Vol. 3, N° 2, April 1988.

[30] PETIT, A.; ST-JEAN, G.; FECTEAU, G. – “Empirical Model of a Current-Limiting Fuse using EMTP ” - IEEE Transaction on Power Delivery, Vol. 4, N° 1, January 1989.

[31] MUENCH, F. J.; DUPONT, J. P. – “Coordination of MOV Type Lightning Arresters and Current Limiting Fuses” - IEEE Transaction on Power Delivery, Vol. 5 N° 2 April 1990.

[32] BRECHTKEN, D.; KÖNIG, D. – “Time/Current Characteristics and Breaking Capacity of Experimental Vacuum Fuses.” – IEEE Transaction on Electrical Insulation Vol. 28, N° 4, August 1993.

[33] Fusivel + Vacuo – “Time/Current Characteristics and Breaking Capacity of Experimental Vacuum Fuses.” – IEEE Transaction on Electrical Insulation Vol. 28, N° 4, August 1993.

[34] FLETCHER, H.; LEIX, K.; VASSILIOU, N.; VOUKELATOS, J. – “The Lightning Protected Transformer: How to Improve Distribution Transformer Reliability, Safety and Economics Through a Coordinated Approach to Overcurrent and Overvoltage Protection.” – IEEE/NTUA Athens Power Tech Conference: Planning, Operation and Control of Today’s Electric Power Systems”, Athens, Greece, Sept. 5-8, 1993.

[35] WOLNY, A.; STOKES, A. D.; KACPRZAK, B. “High-Voltage Fuse Behaviour with Varistor Commutation.” – IEE Proc. Gener. Transm. Distrib. Vol. 141, N° 1, January 1994.

[36] CHAO, T. “Electronically Controlled Current Limiting Fuses.” – IEEE 1995.