



**XXIII SNPTEE
SEMINÁRIO NACIONAL
DE PRODUÇÃO E
TRANSMISSÃO DE
ENERGIA ELÉTRICA**

FI/GSE/01
18 a 21 de Outubro de 2015
Foz do Iguaçu - PR

GRUPO – VIII

GRUPO DE ESTUDO DE SUBESTAÇÕES E EQUIPAMENTO DE ALTA TENSÃO - GSE

EXPLOSÃO EM TRANSFORMADORES DE CORRENTE (TC) – UM ESTUDO DE CASO

**Marco Antonio Marin(*)
COPEL G&T S.A.**

**Aguinaldo Goes de Melo
COPEL G&T S.A.**

**Daniel Benetti
COPEL G&T S.A.**

**Roberto de Aguiar
Instituto Lactec**

**Vinicius Bacil
Instituto Lactec**

RESUMO

Na Copel G&T as falhas em TCs nos últimos anos têm se mantido dentro dos padrões aceitáveis, porém no período de uma semana no mês de fevereiro de 2014 ocorreram falhas, seguidas de explosão em cinco TCs de 245 kV em quatro subestações localizadas no Paraná.

Os cinco TCs que falharam eram do mesmo projeto (fabricante e ano de fabricação), assim sendo a primeira providencia foi retirar os equipamentos idênticos de operação.

Esse trabalho irá apresentar o resultado dessas investigações e ensaios, apontando o modo de falha e a causa raiz da falha e propondo medidas para evitar futuras falhas.

PALAVRAS-CHAVE

Transformador de corrente, Falhas em TCs, Explosão em Subestações.

1.0 - INTRODUÇÃO

Nos mês de fevereiro de 2014 ocorreram 05 (cinco) falhas em TCs com ocorrência de explosão, sendo:

- Dia 01/02 - Geral B 230kV da SE PIL;
- Dia 04/02 - Geral B 230kV da SE FRA;
- Dia 05/02 - Geral B 230kV da SE LNA;
- Dia 07/02 - Circuito de Transferência 230kV da SE CEL;
- Dia 08/02 - Circuito da Linha CVO1 da SE CEL.

Foram feitos os levantamentos preliminares das falhas, onde já foi possível observar algumas características comuns as falhas:

- 05 falhas em 04 subestações (Curitiba, Figueira, Londrina e 02 em Cascavel);
- Falhas ocorridas entre 02 a 08 de fevereiro de 2014;
- O verão de 2014 foi um dos mais quentes dos últimos anos, e nessa semana de fevereiro as temperaturas máximas ultrapassaram aos 40 °C;
- Todas as falhas ocorreram no período noturno;
- Em todas as falhas ocorreu a explosão da porcelana seguida de incêndio;
- Em três das ocorrências ocorreram danos nos equipamentos ligados ao secundário dos TCs;
- Todos os TCs são do mesmo fabricante;
- Todos os TCs são do mesmo tipo (top –core) e foram fabricados em 1981 (33 anos de operação);
- Não houve relação entre os carregamentos dos TCs, inclusive um TC estava operado a vazio no circuito de transferência).



1.1 Condições Operacionais e Ambientais

- Carregamento: Não foi observado relação entre os níveis de carregamento dos TCs avariados, inclusive o TC do Circuito de Transferência 230kV da SE CEL estava energizado a vazio, de forma que é possível supor que o carregamento não tem relação com as causas das falhas;
- Temperatura de serviço: Apesar de circular altas correntes no primário dos TCs a elevação de temperatura é muito pequena, estando a variação de temperatura nesses equipamentos relacionadas diretamente com a temperatura ambiente;
- Temperatura ambiente: As temperaturas no Paraná durante o verão de 2014 foram extremamente rigorosas, ultrapassando durante o dia aos 40 °C (máximas média de 29 °C). É grande a possibilidade dos altos valores de temperatura ambiente terem influência direta sobre as causas das falhas, condição essa reforçada pelo curto período entre as falhas (05 falhas em 07 dias);
- Hora das ocorrências: As falhas ocorreram sempre no período noturno, ou seja no período em que estava ocorrendo decréscimo da temperatura;
- Características dos TCs: Por se tratar de equipamentos idênticos quanto ao projeto e ao ano de fabricação, alguma característica relacionada a concepção do equipamento esta influenciando na causa da falha. É muito difícil afirmar que a falha ocorreu por um problema de projeto ou fabricação quando se trata de equipamentos com mais de 30 anos de operação. A causa da falha deve estar sim atrelada ao projeto do equipamento, porém condicionado a defeito originado pelo envelhecimento.

1.2 Características das falhas em TCs

Buchas de alta tensão e transformadores de corrente estão entre os equipamentos do sistema elétrico mais vulneráveis a falhas*, porque eles são submetidos a altas tensões, e a severos esforços térmicos e dinâmicos.

* A estatística mundial (Cigré 57/1990) mostra que a probabilidade de falha em transformadores de medida é de aproximadamente 1/2000 unidades-ano. [2].

O padrão de falha de transformadores de corrente geralmente é violento, catastrófico e, em alguns casos pode ser fatal. A natureza dessas falhas torna difícil, na maioria dos casos, determinar a causa raiz da falha.

A maior parte dos transformadores de corrente são hermeticamente selados. Devido ao selo, a qualidade do papel e a do óleo não pode ser facilmente avaliada. A qualidade do selo se deteriora ao longo dos 30 anos de serviço nas duras condições climáticas do Brasil, temperatura de verão de 40 graus são comuns, e a entrada de umidade e deterioração da qualidade de isolamento é apenas uma questão de tempo.

Após a deterioração do isolamento, uma falha pode ocorrer. A falha repentina de um transformador de corrente em uma subestação de transmissão pode representar prejuízo de milhares de reais por dano no próprio TC, avaria em outros equipamentos dentro da área circum-adjacente ao TC e com as perdas de receitas.

1.3 Causas Primárias das Falhas

Para uma análise mais aprofundada as principais causas de falha foram divididas em sete grandes categorias:

- Falhas de projeto, que incluiu o projeto elétrico ou mecânico da unidade, bem como a escolha dos materiais utilizados na construção e, portanto, pode afetar a maioria das unidades dentro de um mesmo projeto;
- Controle de qualidade inadequado durante a fabricação que afetou a integridade elétrica ou mecânica de forma aleatória, ou lotes de unidades dentro de um design comprovado e incluí problemas como a má aplicação de sistemas de isolamento, isolamento contaminado, defeitos na montagem, entrada de umidade, vazamento de óleo ou de gás e problemas de corrosão;
- Envelhecimento, unidades normalmente com mais de 25 anos de idade que apresentaram uma diminuição geral de confiabilidade;
- Sobre tensão, descargas atmosféricas;
- Operação fora da especificação, como ferroresonância, descargas capacitivas, condições de serviço anormais, terremotos, falhas de equipamentos adjacentes e outras condições ambientais para as quais as unidades não foram projetadas;
- A manutenção inadequada, também incluindo instalação incorreta ou procedimentos operacionais inadequados;
- Desconhecido, o que significa falhas inexplicáveis e pode ser devido a combinações de outras causas.

A partir da literatura, descobriu-se que, geralmente, a maioria das falhas em transformadores de corrente apresentam algumas características em comum:

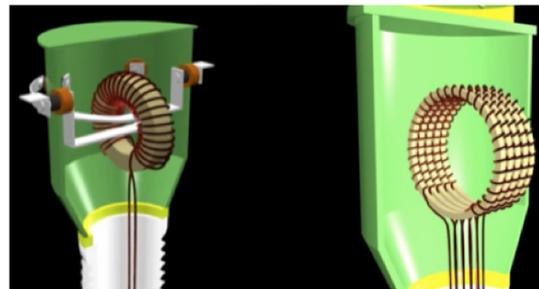
- Falhas em meses de alta temperatura;
- Falhas ocorrem em período noturno;
- Maioria das falhas nos modelos “top core” (cabeça invertida);
- Falhas seguidas de explosão da porcelana e incêndio;
- Em um dos estudos feito no México, vários TCs falharam no período de uma semana.

2.0 - CARACTERÍSTICAS CONSTRUTIVAS DOS TCS SOB ANÁLISE

Os vários secundários são agrupados e envolvidos por uma blindagem metálica (normalmente alumínio) denominada virola.

Essa técnica possibilita que em uma eventual falha do isolamento primário a descarga ocorra para a virola, que esta aterrada, evitando assim a transferência do potencial primário para o secundário.

A virola também possibilita a confecção do isolamento em camadas condensivas, fazendo uma melhor distribuição do campo elétrico.

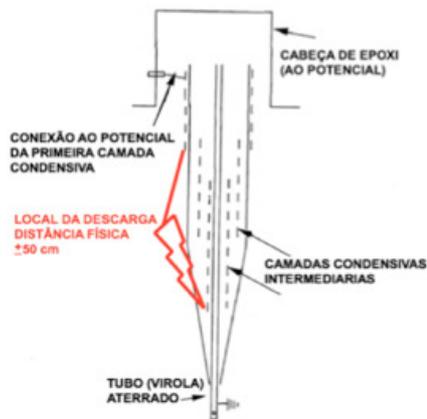


3.0 - INVESTIGAÇÃO POST MORTEM

Foi efetuada uma investigação post mortem nos 05 (cinco) TCs avariados, observou-se que o modo de falha foi o mesmo em todos os TCs, porém provavelmente em função do tempo em que os equipamentos ficaram

energizados sob falha (tempo de atuação da proteção) as consequências da falha foram diferentes nos 05 equipamentos. Em dois desses TCs (SE/LNA e o do circuito transferência da SE/CEL) os estragos causados pela explosão e incêndio foram mínimos, praticamente se limitando a explosão da porcelana. Esses dois TCs possibilitaram identificar claramente o modo da falha. Em outros dois TCs (SE/PIL e SE/FRA) os estragos ficaram em uma escala intermediária onde foi possível observar a evolução da falha. Já no TC do Circuito da Linha CVO1 da SE CEL as consequências da ocorrência foram muito violentas, impossibilitando qualquer análise.

Modo da falha



4.0 - CAUSA RAIZ DA FALHA

O modo de falha ficou bem definido nas análises post mortem, ocorre uma descarga entre a primeira camada condensiva (ao potencial) e as últimas camadas condensivas (tubo inferior da virola, no potencial de terra). Na maioria das vezes a descarga furou o tubo metálico, atingindo a fiação secundária, elevando o potencial nos enrolamentos secundários, provocando descargas entre secundário e a massa (virola) e danificando instrumentos na casa de comando da subestação. Como consequência ocorre a explosão seguida de incêndio.

O que acontece imediatamente após a primeira descarga elétrica, culminado com a explosão e suas consequências esta definido. Fica nítido que a descarga acontece em função de uma redução da rigidez dielétrica naquele ponto, porém para definir o que provoca essa redução, quais os mecanismos envolvidos, e porque eles acontecem sob determinadas condições se faz necessário estudos complementares para subsidiar essa análise.

A identificação da causa raiz é absolutamente necessária para que sejam traçadas as políticas de manutenção para prevenir futuras falhas.

A causa raiz vai estar ligada as condições em que ocorreram as falhas, principalmente porque essas condições foram apontadas também na literatura pesquisada, quais sejam.

1. Idade dos TCs (envelhecimento);
2. Falhas em meses de alta temperatura;
3. Falhas ocorrem em período noturno;
4. Falhas em TCs idênticos (mesmo tipo e fabricante);
5. Maioria das falhas nos modelos "top core" (cabeça invertida);
6. Falhas seguidas de explosão da porcelana e incêndio.

Avaliação das condições em que ocorreram as falhas.

4.1 Idade dos TCs (envelhecimento)

Os mais de 30 anos de operação devem ter contribuído para a falha, não isoladamente, outros fatores aliados ao envelhecimento contribuíram para a falha. As estatísticas disponíveis na literatura não apontam o envelhecimento

como causa determinante, temos também um exemplo na Copel, em 2003 ocorreu na subestação de GPS uma falha idêntica com um TC com 18 anos de operação.

Sabe-se que a umidade contribuí para o decréscimo da rigidez dielétrica e a umidade pode estar presente no isolamento de duas maneiras principais, uma é pela perda de estanqueidade, e é de conhecimento das equipes de manutenção que a maioria dos TCs Balteau apresentaram problemas nos foles de expansão, com necessidade de troca. A outra possibilidade é pelo próprio envelhecimento do papel, cujo processo apresenta a formação de água.

Análises feitas no óleo indicavam em média 35 ppm de água e as análises do papel apresentaram um GP médio de 600.

De modo geral esses valores estão dentro dos limites aceitáveis para TCs com mais de 30 anos, porém são valores que sobre determinadas condições podem propiciar formação de bolhas no isolamento.

4.2 Falhas em meses de alta temperatura

A temperatura teve influência direta nas falhas, os TCs não apresentam elevação de temperatura em decorrência do funcionamento, mesma com circulação da corrente nominal. A temperatura de operação é diretamente influenciada pela temperatura ambiente. No Brasil é comum altas temperaturas nos meses de verão, porém o verão de 2014 apresentou temperaturas maiores que as habituais, e a ocorrência das falhas no período de uma semana em cidades diferentes e distantes, tendo somente em comum a temperatura, levam a certeza que a temperatura influenciou diretamente no processo da falha.

Relação entre Temperatura x Umidade x Perdas

O. Reyes, H. Lara e M. Guzmán, mostraram em seu estudo a relação entre a Temperatura x Umidade x Perdas realizando ensaios de fator de potência do isolamento em TCs considerando essas variáveis. [1]

4.3 Falhas ocorrem em período noturno

As altas temperaturas aumentam as perdas no dielétrico, mais esse aumento não é suficiente para ocasionar a descarga, e quando a temperatura começa a diminuir que ocorre um acréscimo nos níveis de descargas parciais [1].

4.4 Ensaios complementares

Mesmo havendo referências na literatura, já mencionadas nos itens anteriores, mostrando a influência da temperatura e umidade no surgimento (acrécimo) das descargas parciais (DP) e no aumento do fator de potência do isolamento (FP%), resolveu-se realizar ensaios com incremento da temperatura em TCs idênticos aos que falharam.

Medição de descargas parciais

Esse ensaio foi fundamental para comprovar que numa determinada faixa de temperatura, algum fenômeno acontece, aumentando de forma muito significativa as descargas parciais. As descargas parciais foram tão altas (8000 pC é o limite máximo de medição) que eram audíveis, verificando-se com instrumento acústico, que o maior índice de DP ocorria na região intermediária da porcelana.

Temperatura medida no TC	Tensão	Descargas Parciais	Observações
68,5 °C	25 kV	3000 pC	
62,0 °C	25 kV	3000 pC	
55,0 °C	25 kV	3000 pC	
50,0 °C	25 kV	3000 pC	
45,0 °C	25 kV	8000 pC	
40,0 °C	25 kV	8000 pC	
35,0 °C	25 kV	8000 pC	
30,0 °C	25 kV	8000 pC	
15,0 °C	25 kV	60 pC	Equilíbrio com temperatura ambiente
15,0 °C	90 kV	2000 pC	Equilíbrio com temperatura ambiente

Ensaio de campo

Durante a realização dos vários ensaios e estudos, além de se buscar a causa raiz das falhas, procurou-se encontrar uma metodologia, que fosse através de monitoramento e/ou ensaios convencionais de campo e/ou laboratório, em que fosse possível se antever a evolução das causas da falha, podendo assim se determinar uma política de manutenção para evitar a principal consequência da falha, que é a explosão do equipamento.

Dentro dessa filosofia, além dos ensaios em laboratório, executou-se num lote considerável de TCs idênticos e de projetos semelhantes aos TCs que falharam, uma bateria de ensaios de campo, utilizando-se instrumentos e técnicas atuais disponíveis na Copel e Lactec.

Os resultados dos ensaios no óleo e no papel isolante é possível identificar um maior envelhecimento dos TCs fabricados em 1981 em relação aos fabricados em outros anos. Esses ensaios (assim como os ensaios de FP% e DP realizados com acréscimo de temperatura realizados no Lactec), nos servem para determinar as causas das falhas, porém não é possível utilizá-los como técnicas preventivas, devido a impossibilidade da retirada das amostras. A possibilidade da retirada da amostra de óleo pode até ser possível em TCs que apresentem registros e/ou dispositivos para essa finalidade, mais que não é o caso dos TCs em questão.

Nos demais ensaios verificou-se um resultado interessante nos ensaios de Fator de dissipação com variação de frequência, em que o ensaio de FP% é realizado com 10 kV variando-se a frequência num range de 10 a 400 Hz e no ensaio de Espectroscopia no domínio da frequência (FDS) [4], realizado com o instrumento IDAX.

5.0 - CONCLUSÃO

A conjunção de alguns fatores foram determinantes para as falhas, entre os quais:

- Envelhecimento, além da degradação natural do isolamento papel /óleo, nesses TCs ainda houve um incremento pela entrada de umidade, por problemas de estanqueidade no sistema de compensação do volume de óleo. A idade do TC não é fator único para a retirada de operação, ensaios para avaliar o estado do isolamento devem complementar essa decisão;
- Temperatura, o alto valor da temperatura ambiente, mais principalmente a variação da temperatura (resfriamento) foi fundamental na falha. Ensaio de laboratório comprovaram essa condição. A temperatura também não é fator único, ela só representa problema se o isolamento apresentar um determinado grau de degradação;
- Umidade, fator determinante na falha, independente da origem (envelhecimento natural ou perda de estanqueidade). A dinâmica natural do equilíbrio da umidade entre o papel e o óleo produziu bolhas, que deram origem as descargas parciais culminando no colapso do isolamento.

A causa raiz da falha é uma conjunção desses três fatores.

Quanto ao projeto do equipamento, dois fatores ambíguos devem ser considerados. Se cinco equipamentos iguais falham, fica evidente que as características construtivas influenciaram na falha, por outro lado os equipamentos ultrapassaram o tempo estimado de vida útil. Dessa forma o projeto não foi considerado fator determinante para a falha, porém equipamentos de projeto similares devem ser averiguados quanto ao estado da isolação e estanqueidade, ou seja, o projeto não apresenta problemas desde de que sejam preservadas as características dielétricas do sistema de isolamento.

6.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) O. Reyes, V. R. Garcia-Colon - H. Lara, E. Robles e M. Guzmán, F. Elizarraraz, J.C. Martínez - Abnormal Failure Rate on High Voltage Current Transformers Affected by Environmental Conditions.
- (2) W. Mcdermid, T. Black – Failure of Service Aged 230 kV Current Transformers.
- (3) Deepak Rampersad - Investigation into Current Transformer Failures within ESKOM Distribution.
- (4) José Mário Ribeiro Osório – O Estado da Arte do Transformador de Medida.
- (5) M. Koch, M. Krueger, L. Giacchetta, M. E. C. Paulino - Diagnóstico em campo para determinação de umidade em Transformadores.