



Grupo de Estudo de Subestações e Equipamentos de Alta Tensão-GSE

Efeito dos Transitórios Rápidos gerados por manobra de seccionador sobre transformadores de corrente do tipo Top-Core

**FLAVIO EDUARDO SPRESSOLA(1); HELVIO JAILSON AZEVEDO MARTINS(2); JOSÉ GERALDO BARRETO MONTEIRO DE ANDRADE(3);
GE(1);Consultor(2);GE(3);**

RESUMO

As sucessivas disrupções do dielétrico entre os polos de um seccionador que surgem durante uma manobra, geram nos terminais de alta tensão dos equipamentos conectados, transitórios rápidos. Estes transitórios podem provocar cumulativamente danos nos sistemas de isolamento desses equipamentos. Para os transformadores de corrente, cujo tipo construtivo lhe impõe uma característica proeminentemente capacitiva, surtos de corrente podem comprometer o seu sistema isolante papel-óleo.

Este trabalho apresenta uma revisão bibliográfica sobre os transitórios rápidos e seus efeitos sobre o isolamento de transformadores de corrente e discute a avaliação do desempenho destes equipamentos sob estas condições através de ensaios.

PALAVRAS-CHAVE

Transientes Rápidos, Seccionador, Transformador de corrente, Isolação, Suportabilidade Dielétrica

1.0 - INTRODUÇÃO

Com o atípico número de sinistros de Transformadores de Corrente (TC) no sistema em algumas concessionárias do setor elétrico brasileiro, cresce o interesse pelos fenômenos que podem provocar degradação desses equipamentos. De 2013 a março de 2019, mais de 50 incidentes ocorreram, a maior parte envolvendo instalações localizadas nas regiões Centro-Oeste e Norte. Este elevado índice de ocorrências é relevante não apenas pelos prejuízos físicos e econômicos, mas principalmente pelo risco à segurança dos trabalhadores do setor elétrico [1][2][3]. Todos esses sinistros são de equipamentos do tipo "Top Core".

Embora existam vários artigos discutindo os fenômenos transitórios e seus efeitos sobre o TC, percebe-se que muito do processo de degradação e falha do equipamento continua incerto. O desempenho de um TC frente a estes transitórios tem sido avaliado através do ensaio de múltiplos impulsos cortados (MIC) o qual provoca circulação de altas correntes nas blindagens internas do equipamento, sendo importante para identificar deficiências do equipamento frente aos transitórios. Porém, aparentemente, este ensaio não cobre todas as condições de campo [1][2][3], como percebido pelo número de surtos aplicados e o nível de energia envolvido neste ensaio comparado a resultados de simulações e medições em campo.

2.0 - TC E SISTEMA ELÉTRICO

2.1 TC do tipo "Top-Core"

Diferentes soluções construtivas são empregadas para TCs de alta-tensão isolados com papel-óleo. A solução mais comum atualmente é o TC Invertido ou "Top Core", na qual os enrolamentos secundários são posicionados no

topo do TC, abrigados em uma caixa metálica conectada a um tubo através do qual os cabos descem para conexão aos terminais secundários, na base do equipamento. O conjunto formado pela caixa metálica e tubo é conectado ao potencial de terra proporcionando uma blindagem de potencial zero para os secundários, sobre a qual o isolamento papel-óleo é construído.

A geometria das camadas de papel deve ser cuidadosamente projetada e combinada à inserção de blindagens equipotenciais constituídas de telas metálicas e/ou papel semicondutor para garantir uma distribuição adequada de campo elétrico. A inserção destas telas ao longo da espessura do isolamento deve ser feita em distâncias regulares e de forma que as diferenças de potencial entre telas adjacentes sejam as mesmas ao longo de toda a espessura do isolamento. O projeto destas telas tem importância fundamental para o desempenho do equipamento frente a transitórios de alta-frequência, tais como, surtos atmosféricos e operações de abertura e fechamento de seccionadores [3].

2.2 Eventos no sistema elétrico brasileiro

De 2012 a maio de 2019, ocorreram 157 perturbações na Rede Básica originadas por explosão de TCs, distribuídas ao longo dos anos como mostra a Figura 1. Cerca de 27% destas perturbações causaram corte de cargas, sendo em torno de 15% acima de 100MW.



FIGURA 1 – Total de explosões de TC – Rede Básica – Período de 2012 a maio 2019

2.3 Grupos de estudo

Dado o alto índice de falha, foi criado em 2014, no âmbito do MME, ANEEL e ONS, um Grupo de Trabalho (GT), cujo objetivo era identificar melhorias no processo de substituição de transformadores para instrumentos (TP e TC), disjuntores e para-raios frente à possibilidade de fim de vida útil dos mesmos, incluindo ocorrências originadas por explosões destes. Tendo em vista a maior concentração de ocorrências de um determinado tipo de TC foi criado um grupo de estudo com o objetivo de identificar possíveis causas destes incidentes com TCs e métodos de diagnóstico que permitam evitá-las [17].

Por solicitação deste grupo, a Comissão de Estudo ABNT/CE-003:038.001 do COBEI criou um grupo de trabalho, composto de representantes das concessionárias, fabricantes e instituições de pesquisa para realizar uma revisão bibliográfica dos efeitos transitórios sobre transformadores de instrumentos. Este trabalho gerou uma correspondência para a IEC, fundamentada em diversos artigos técnicos, recomendando entre outras ações melhorias no procedimento existente do ensaio de múltiplos impulsos cortados, além de apontar a necessidade de pesquisas que permitam a proposição de um ensaio que melhor represente condições operativas [14].

3.0 - O ARCO ELÉTRICO NA MANOBRA DE SECCIONADOR

Durante manobras de seccionador com tensão em uma subestação convencional isolada a ar ocorre, entre os polos do seccionador, uma sucessão de interrupções de corrente e reignições de arcos elétricos. Em cada reacendimento destes arcos elétricos são geradas inúmeras sobretensões transitórias de alta frequência que se propagam através do barramento ou das conexões de equipamentos e causam solicitações similares a múltiplos impulsos no isolamento dos equipamentos das subestações, as quais são mais severas em equipamentos diretamente conectados aos seccionadores, tais como os TCs.

Manobras de seccionadores tanto de abertura como de fechamento geram um arco elétrico aparentemente contínuo da ordem de poucos segundos. Quando analisado numa escala de tempo apropriada, percebe-se que o arco é composto de centenas de reignições conforme se observa nas Figuras 2 e 7 que apresentam medições de manobras típicas de abertura e fechamento tomadas de um artigo que realizou medições em campo [10].

A severidade e quantidade destas tensões transitórias variam de acordo com a sequência de manobra adotada e tipo de seccionador, dadas as diferenças de desenho, tempo de abertura/fechamento e velocidade de acionamento.

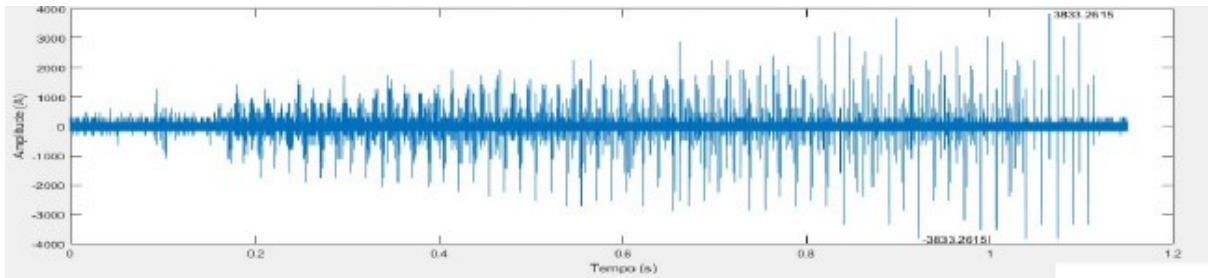


FIGURA 1 - Corrente transitória durante manobra de abertura de seccionador

4.0 - EFEITOS DOS TRANSITÓRIOS RÁPIDOS SOBRE O ISOLAMENTO

Os primeiros trabalhos relatando o efeito das ondas de tensão de frente rápida em isolamento papel-óleo estão relacionados a manobras de seccionador em subestações isoladas a gás SF₆. No caso do Brasil, menciona-se como consequência, as restrições impostas a operação desses equipamentos já na década de 1980, em função de falhas em buchas e transformadores da SE Grajaú 500 kV.

No caso do presente trabalho, os eventos de transitórios rápidos são gerados não por uma chave com seus contatos imersos em SF₆, porém, no ar atmosférico. As pesquisas pioneiras sobre o efeito desses transitórios de frente rápida em isolamento papel-óleo, datam da década de 1990 [4]. Até então, os mecanismos que explicavam a suportabilidade de um dielétrico, desde solicitações quase-estáticas, como em tensão contínua, até aquelas oriundas de descargas atmosféricas eram baseadas, na distribuição de cargas espaciais entre os eletrodos envolvidos e o isolamento, durante a referida solicitação de tensão. A curva tradicional de suportabilidade de um dielétrico é uma função inversa do tempo de frente da onda, isto é, quanto menor o tempo da frente da onda, maior a suportabilidade do dielétrico.

Para haver a disrupção de um meio isolante é necessário haver um início de descarga, formação de streamers (canais de ionização formados a partir da avalanche de elétrons livres), ionização (processo pelo qual ocorre a formação de ions.), etc. O principal agente de ionização são os elétrons livres que se encontram naquele meio. A distorção causada pelo volume de cargas ao longo do isolamento é diferente entre a polaridade positiva e negativa. Nas solicitações elétricas sob polaridade positiva, os elétrons estão sendo atraídos para o eletrodo, indo para regiões de campo cada vez mais intenso, acelerando e ionizando por impacto. Enquanto que para aquelas sob polaridade negativa, os elétrons estão se afastando do condutor e perdendo 'força', dificultando a formação da descarga. A formação de descarga num eletrodo sob polaridade positiva sempre é mais 'eficiente' do que para o mesmo eletrodo sob polaridade negativa, o que explica a razão da suportabilidade do dielétrico ser sempre maior para solicitações de polaridade negativa.

O que se sabia até então, é que, à medida que a frente da onda de tensão ia sendo reduzida, maior era a suportabilidade do dielétrico, porém, para frentes de onda de alguns a dezenas de nanossegundos, provou-se que este comportamento é anômalo, ou seja, os isolantes convencionais, como papel-óleo tem sua suportabilidade reduzida [4]. Até o momento, não existe na literatura técnica, trabalhos que expliquem como se processa esse mecanismo de redução da suportabilidade. Tem-se ainda o agravante de que, normalmente, a manobra de seccionador proporciona um trem de pulsos de altíssima frequência. No presente caso, cada operação chegou à ordem de 500 reignições, sendo mais severa a manobra de abertura ou fechamento do seccionador com a sua simétrica na condição aberta, ou seja, sem referência de tensão ou com tensão induzida por circuitos paralelos. O trabalho mais recente sobre o efeito de ondas rápidas em papel-óleo [5], refere-se à aplicação de impulsos atmosféricos em amostras de papel-óleo, representando o efeito cumulativo dessas ondas no dielétrico. Com uma nova técnica, a microscopia atômica, os autores conseguiram identificar as alterações que ocorrem com as amostras de papel, desde virgens (não solicitada eletricamente) até algumas centenas de solicitações de impulso atmosférico (onda padrão 1,2x50µs), conforme mostrado nas Figuras 3 e 4, as quais apresentam as estruturas moleculares de amostras de papel, respectivamente, antes e após as solicitações de impulso atmosférico.

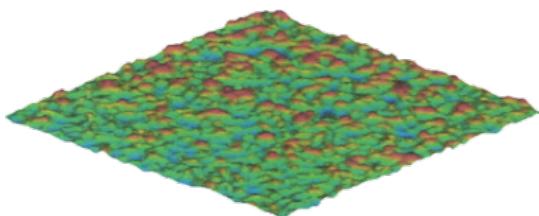


FIGURA 2 - Amostra virgem

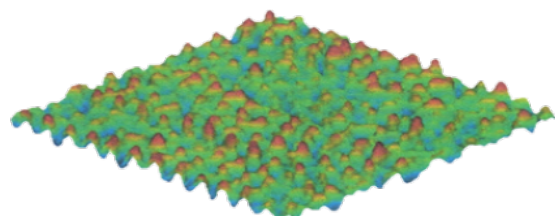


FIGURA 3 - Amostra após 800 aplicações de IA

Como consequência das alterações identificou-se: redução da suportabilidade dielétrica da amostra à medida que o número de impulsos aplicados vai aumentando (efeito cumulativo), alteração da rugosidade superficial do papel, formação de subprodutos e alteração permanente da estrutura do papel. Aventa-se que a alteração da rugosidade

superficial do papel, implicaria em ocorrência de microdescargas parciais, levando ao envelhecimento precoce do papel.

5.0 - REQUISITOS DE NORMAS PARA DESEMPENHO DE TC FRENTE A TRANSITÓRIOS RÁPIDOS

O desempenho de um TC frente a transitórios rápidos é avaliado através de 2 ensaios: múltiplos impulsos cortados (MIC), cujo objetivo é verificar a suportabilidade do equipamento frente a estes transitórios, e sobretensão transferida (ST), o qual se destina a avaliar a eficiência do projeto em limitar a transferência de surtos ao circuito secundário.

O ensaio de MIC consiste na aplicação de 600 ondas de impulso cortado ao isolamento principal do TC. O corte é realizado logo após a crista do impulso. Os valores do tempo de colapso e tensão reversa (30% do valor de crista da tensão de ensaio) são especificados com o objetivo de obter uma taxa de variação da tensão em relação ao tempo (dV/dt) suficientemente elevada para produzir uma circulação de corrente nas blindagens internas do isolamento do TC similares às condições dos surtos de abertura de seccionadores.

O valor de crista da tensão é definido a partir de um percentual do Nível Básico de Isolamento (NBI), sendo 70% para o método IEC[7]/ABNT NBR e 80% para IEEE[9] a qual justifica a tensão mais elevada pela adição de margem de 15% para levar em conta o envelhecimento do equipamento ao longo dos anos.

A diferença na tensão de ensaio entre os dois métodos torna-se superior a 15% para algumas classes de tensão quando se observa a diferença entre os valores mais elevados de NBI adotados por tais normas, como se vê na Figura 5 na qual os valores de NBI são apresentados em p.u. Observa-se, particularmente, ao comparar-se o nível 420 kV - IEC[7] com os níveis 550 kV - IEC[7] e 550 kV - IEEE[9], que o valor do NBI em pu para o nível 420 kV - IEC[7] alinha-se mais com o nível de severidade do nível 550 kV-IEEE[9] do que com o nível 550 kV - IEC[7].

Observa-se que do ponto de vista de coordenação de isolamento, os valores de NBI estão alinhados com os para-raios definidos pela tabela normativa de coordenação de isolamento, escolhidos para cada valor de NBI. Por outro lado, quando se observam as distâncias entre o para-raios e o TC e se leva em consideração ser este em fenômeno de frente de onda muito rápida nota-se que o para-raios terá influência muito limitada ou nenhuma na contenção deste fenômeno, seja pela resposta do para-raios à velocidade do transitório, seja pela distância que se encontra.

Assim, quando se utiliza um percentual do NBI para determinar a tensão de um ensaio que verifica a suportabilidade do equipamento frente a um transitório de abertura de seccionador, transitório este para o qual o para-raios não confere adequada proteção, tal especificação de tensão de ensaio pode tornar-se incompatível com a severidade destes surtos em campo. Esta consideração pode mostrar que o ensaio de MIC baseou-se em premissas insuficientes para atestar o desempenho do equipamento para condições típicas em campo. A Figura 6 evidencia esta situação ao comparar as tensões de ensaio de MIC para as classes de tensão de 300 a 800 kV com o valor de crista de uma sobretensão entre 2 e 3 pu (valores em pu encontrado em algumas publicações para este tipo de transitório).

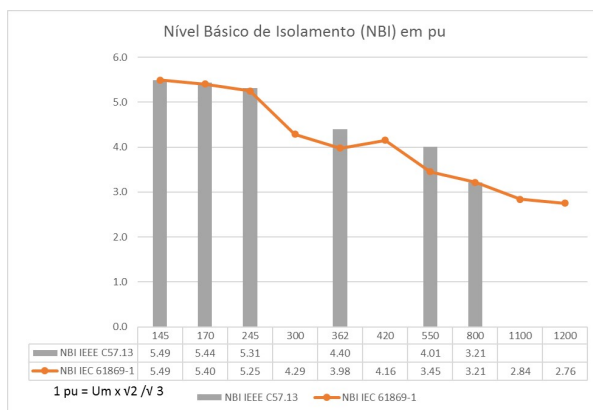


FIGURA 4 - Valores de NBI em pu conforme normas IEC 61869-1 e IEEE C57.13

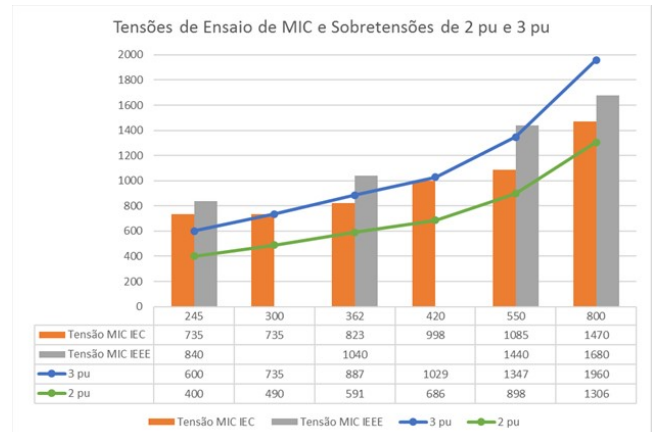


FIGURA 5 - Valores de tensão de ensaio de MIC comparados ao valor de sobretensão de 3 pu

6.0 - CONDIÇÕES AGRAVANTES COM RELAÇÃO AO ENSAIO DE NORMA

Alguns trabalhos [10] [13] [15] apresentam indícios de condições de campo significativamente mais agressivas que as condições do ensaio normalizado. Comparando-se esses resultados às condições de laboratório para os ensaios de MIC mencionados nas normas [7] [9], percebem-se os seguintes fatores que podem representar uma insuficiência normativa: [14]

6.1 Número de Transitórios Rápidos

Enquanto o ensaio de MIC apresenta até 600 aplicações de impulso normalizado, uma única manobra de seccionador pode possuir centenas de impulsos. A Figura 7 apresenta a medição ao longo de todo o período de fechamento de um seccionador, na qual observa-se a duração da manobra (no exemplo em torno de 1,25s) e o grande número de reinições [10].

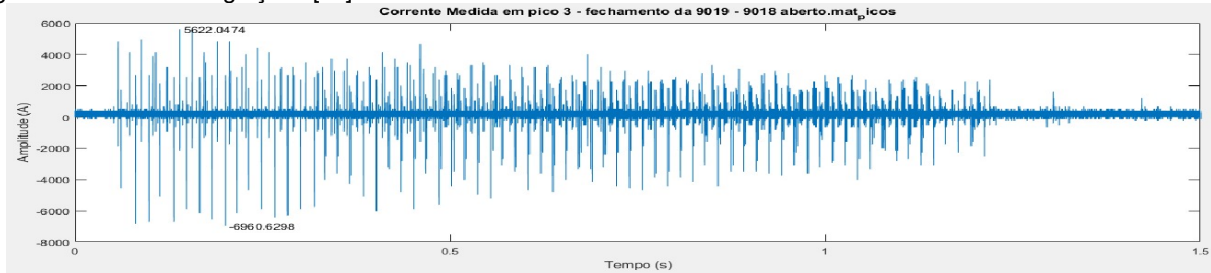


FIGURA 6 - Corrente medida no ponto de terra do TC durante fechamento de seccionador

6.2 Intervalo entre impulsos

O intervalo entre impulsos durante a manobra de uma chave seccionadora é da ordem de mili segundos. O procedimento do ensaio de MIC estabelece um tempo de um minuto entre dois impulsos, resultando em um tempo total de ensaio de 10 horas. [10] [12] [15]

6.3 Nível de energia

A quantidade de energia em uma manobra de chave seccionadora é significativamente maior que a energia dissipada em um impulso do ensaio de MIC. O cálculo de I^2t de um impulso normalizado resulta em aproximadamente $10A^2s$. Por outro lado uma única manobra de seccionador pode atingir várias centenas de A^2s como mostra a Figura 16 [10].

6.4 Espectro de frequência

As componentes na frequência de cada impulso na manobra de seccionador apresentam um espectro com frequências significativamente maiores que o impulso normalizado [6] [10] [13] [15].

6.5 Taxa de crescimento de tensão e tensão de pico calculadas

Embora o valor do pico da tensão é condição dos dados do sistema, existem artigos que indicam valores que podem atingir entre 2 e 3 pu [3] [10] [12].

6.6 Bipolaridade do impulso

A característica do impulso durante a manobra de seccionador é bipolar como mostra Figura 2 e Figura 7, que é a condição mais crítica para a degradação do isolamento [16]. Já o ensaio MIC é realizado apenas com polaridade negativa.

7.0 - RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES

A partir de resultados de de ensaios em campo[10], os quais foram realizados buscando-se melhor conhecer as solicitações de tensão decorrentes das manobras de seccionadores a que os TCs podem estar sendo submetidos, foram realizadas algumas simulações. Uma subestação foi modelada detalhadamente para estudos de transitórios muito rápidos, tais como os de descargas atmosféricas, em que os trechos de barramento e conexões são modelados por parâmetros distribuídos a partir de sua configuração geométrica e cada um dos equipamentos conectados em cada ponto da mesma são representados por parâmetros concentrados, particularmente por sua capacitância equivalente, para as quais as ondas de tensão encontram algum efeito atenuador. O modelo do TC utilizado, definido pelo próprio fabricante a partir de medições, é apresentado na Figura 8.

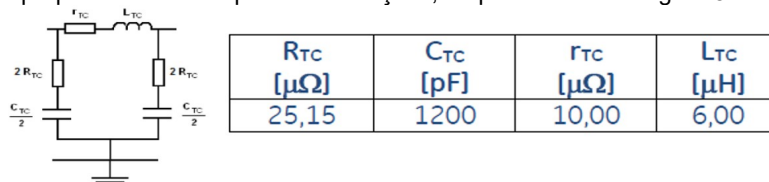


FIGURA 7 - Modelo e parâmetros utilizado para a representação do TC

7.1 Características obtidas com as simulações

A Figura 9 apresenta o resultado do modelo da chave durante sua abertura nas quais as tensões entre os polos nas fases A, B e C aumentam à medida que os contatos da chave se afastam, uma vez que o trecho que está sendo desenergizado é recarregado a cada reinição, que ocorre sempre que a suportabilidade do dielétrico é rompida. A variação da suportabilidade, em ambas as polaridades, foi considerada igual e linear com a distância

entre os contatos. Quanto mais afastados os contatos, maior o pulso de corrente que percorre o trecho do barramento entre a chave e o TC. A tensão a que o isolamento do TC é submetido é exemplificada na Figura 10. Como pode ser visto, a tensão apresenta uma frente bastante íngreme, um pico e uma oscilação estabilizando na polaridade oposta ao valor de tensão anterior.

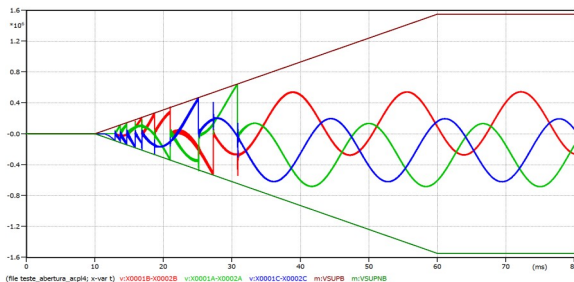


FIGURA 8 - Tensões entre pólos nas fases A, B e C versus suportabilidade do isolamento dos contatos para manobra de abertura do seccionador

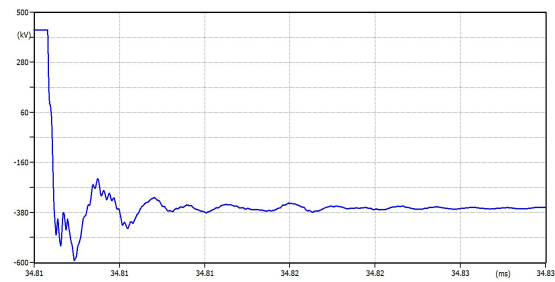


FIGURA 9 - Surto de tensão imposto ao TC para uma das reignições em um dos casos simulados

7.2 Influência do arranjo

Posteriormente, foi analisada a influência do resto da subestação na forma da onda de tensão no terminal do TC, uma vez que a parcela mais relevante do fenômeno analisado está associada à configuração composta pelo trecho que está sendo isolado. A Figura 11 apresenta o circuito correspondente indicando o trecho que está contido entre a chave e o disjuntor, contendo, por sua vez, o TC em análise, cuja representação foi definida a partir da resposta em frequência levantada durante as medições feitas em campo.[10]

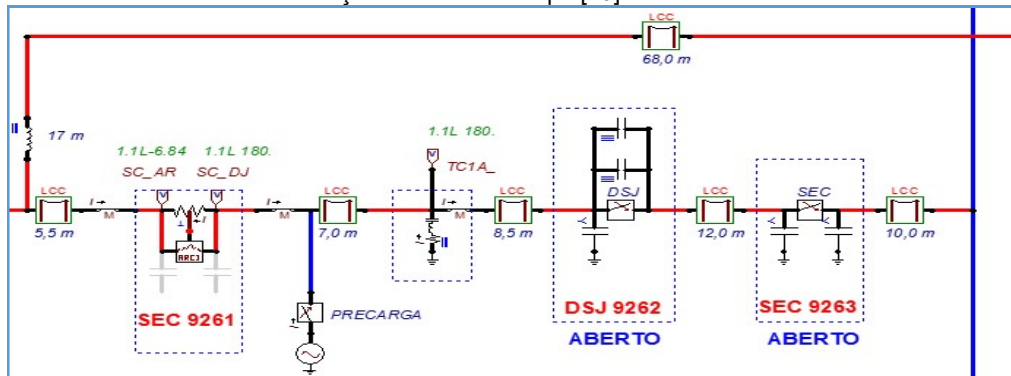


FIGURA 10 - Trecho mais relevante da subestação

Desta forma foram calculadas as formas de onda de corrente e tensão no TC em análise considerando diversas configurações. As 3 configurações principais são mostradas a seguir:

- COMPLETO - Redução de 1 bay e meio da SE contendo 5,5 bays + 5 trechos de barra dupla + 4 saídas de linha
- SIMPLIFICADO4 - Representação mais simplificada da SE contendo 2 bays + 2 trechos de barra dupla + 1 saída de linha
- SIMPLIFICADO5 - Representação simplificada da SE – 1 bays + 1 trechos de barra dupla + 1 saída de linha (1 fonte)

A Figura 12 apresenta duas medições de campo [10], da corrente que atravessa o isolamento do TC. A Figura 13 apresenta os valores de corrente calculada para cada uma das 3 configurações definidas acima. A Figura 14 apresenta a decomposição em Fourier das tensões calculadas no terminal do TC para cada uma das 3 configurações. A comparação das correntes medidas e calculadas indicam uma forma bastante semelhante. A análise espectral da onda de tensão para as 3 configurações aponta que a faixa de frequência do transitório de tensão calculado é a mesma do transitório de corrente medido[10]. A configuração da subestação pode influenciar no valor da componente de mais baixa frequência, mas as componentes de frequências mais alta são muito próximas nos 3 casos.

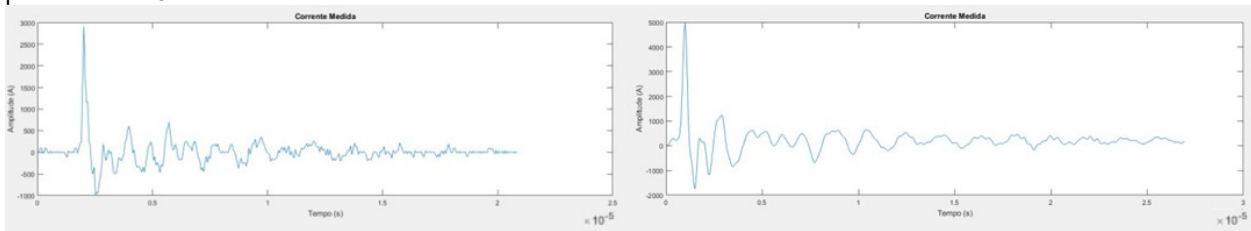


FIGURA 11 - Correntes medidas em campo [10]

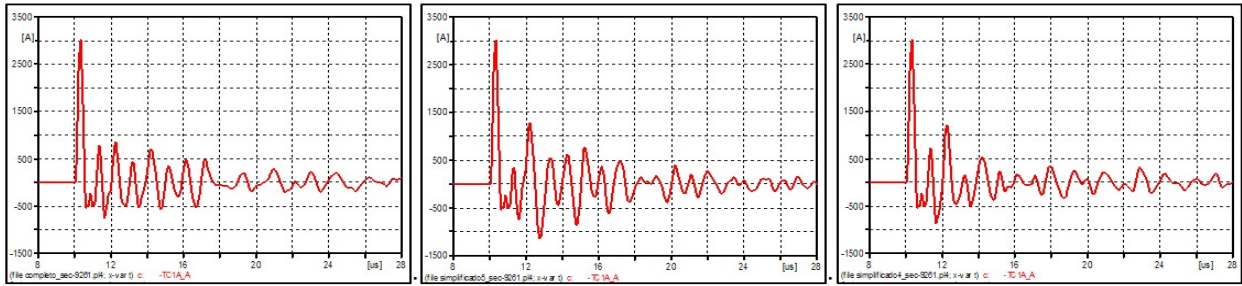


FIGURA 12 - Correntes calculadas para a 3 configurações

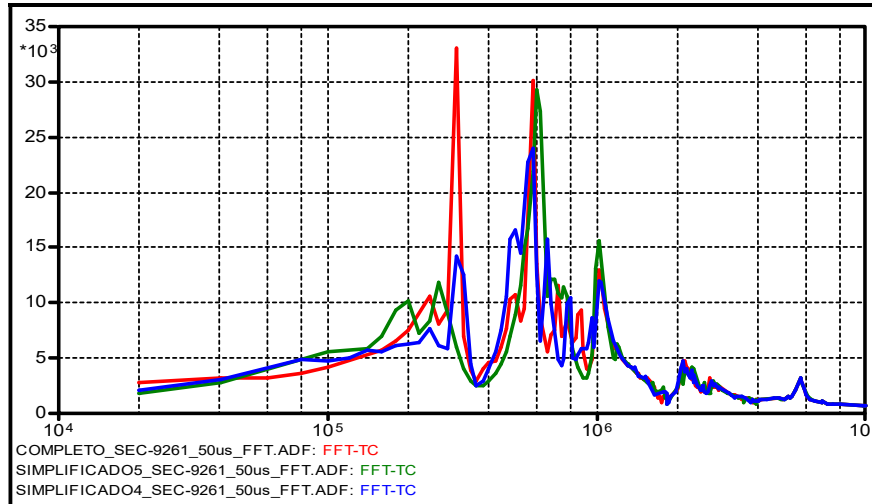


FIGURA 13 - FFT das tensões no primário do TC

8.0 - SENSIBILIDADE DO ISOLAMENTO A TRANSITÓRIOS RÁPIDOS

Dada a característica primordialmente capacitiva do isolamento do TC, o surto que alcança este equipamento produz um alto nível de corrente transitória drenando parte da energia que atravessa o seu circuito primário. A corrente que atravessa o isolamento é proporcional ao nível do surto, à sua frente de onda (dV/dt) e à capacitância do TC. Essa dependência da intensidade e da derivada no tempo é refletida nas normas através de diferentes condições de ensaio. As normas ABNT [8], IEC [7] e IEEE [9] estabelecem ensaios de impulso atmosférico, impulso de manobra e impulso cortado para cobrir o espectro de variação dessas dimensões. Nestes ensaios, os critérios de aprovação avaliam o surgimento de descargas parciais, alterações de fator de dissipação (e capacitância) e geração de gases. Isso demonstra a relevância desse fenômeno sobre a suportabilidade do equipamento para as condições de operação em campo.

Sob transitórios de intensidades elevadas e frentes de onda íngremes (inferiores a $1\mu s$), correntes de valores elevados fluirão pelo isolamento do TC, sendo conduzidas através das blindagens internas, as quais existem com o objetivo de prover uma adequada distribuição de campo elétrico tanto em condições de operação normal, como frente a transitórios de alta frequência (item 2.1). Tais blindagens devem ter dimensões adequadas para condução destas correntes, além de apresentar baixa impedância para garantir a equipotencialização evitando sobretensões indesejadas entre as camadas de isolamento sob condições transitórias [3]. Como apresentado no item 4.0, o dano no isolamento causado por fenômenos de frente íngreme é cumulativo, como afirma a literatura sobre o assunto [4][5][11].

A corrente transitória, embora exista por intervalos de tempo muito curtos, provoca fenômenos térmicos e elétricos, que embora de curta duração, podem tornar-se cumulativamente danosos até progredir para uma falha.

As hipóteses de possíveis mecanismos de falha estão associadas à deterioração das telas de blindagem pela passagem da corrente (energia dissipada durante o surto), ou pelo surgimento de descargas parciais localizadas que podem ser desencadeadas pelo elevado potencial durante o transitório do fechamento da chave (após a operação de fechamento, a tensão de extinção da descarga parcial pode não ser atingida, uma vez que o TC permanece energizado com tensão nominal), ou ainda pela combinação destes mecanismos.

9.0 - CONCLUSÃO

Transitórios devidos a operações de abertura e fechamento de seccionadores provocam correntes transitórias de valores elevados fluindo através do isolamento de TCs. Tendo em vista a severidade desta condição, as normas existentes estabelecem a verificação do desempenho de TCs frente a este tipo de transitório através do ensaio de

múltiplos impulsos cortados (MIC).

Conforme discutido em artigo anterior sobre este mesmo tema [17], após medições em campo realizadas em uma subestação [10] foi observada a ocorrência da falha do TC que apresentou maior valor de corrente medido durante operações de abertura e fechamento de seccionadores, sendo que a falha se deu pouco mais de um mês após a realização das medições.

Mesmo considerando a incerteza que a cautela científica recomenda, os dados permitem afirmar que os transitórios rápidos gerados pelos seccionadores em subestações isoladas a ar são em quantidade e condições mais agressivos que aqueles presentes no ensaio de norma (MIC). Esse conjunto de observações indica que existe a possibilidade de que o efeito integrado dos surtos de manobra dos seccionadores em campo não esteja sendo devidamente avaliado pelo ensaio definido pelas normas, trazendo a necessidade de revisar o método de verificação da capacidade do TC em suportar os transitórios rápidos.

Finalmente, percebe-se que o dano cumulativo provocado pelos surtos de manobra de seccionador pode ser um dos fatores que colaboram na ocorrência das falhas registradas recentemente em TCs no sistema elétrico brasileiro.

10.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) Electric Power Research Institute, "Workshop Proceedings: Failed High-Voltage Instrument Transformer" (EPRI TR-100205, January 1992)
- (2) Working Group SC 23-07 CIGRE. "The paper-oil insulated measurement transformers" (Technical Brochure 57, 1990)
- (3) Study Committee A3 CIGRE. "State of the Art of Instrument Transformers" (Technical Brochure 394, October 2009)
- (4) A. J. Vandermaar, M. Wang, J. B. Neilson, and K. D. Srivastava, "The electrical breakdown characteristics of oil-paper insulation under steep front impulse voltages" (IEEE Trans. Power Del., Vol. 9, 1994, pages 1926-1935)
- (5) W. Sima, P. Sun, Q. Yang, T. Yuan, C. Lu and M. Yang, "Study of the accumulative effect of repeated lightning impulses on insulation characteristics of transformer oil impregnated paper" (IEEE Trans. on Dielect. and Elec. Insulation., Vol. 21, 2014, pages 1933-1941)
- (6) Study Committee A3 CIGRE. "Instrument transformer technology and service behaviour endurance testing – Life test" (Electra number 126, pag 79-92, 1989)
- (7) International Electrotechnical Commission, "Instrument transformers – Part 1: General requirements" (IEC 61869-1, out 2007)
- (8) Associação Brasileira de Normas Técnicas, "Transformador de Corrente – Especificação e ensaios" (ABNT NBR 6856, 05.02.2015)
- (9) The Institute of Electrical and Electronics Engineers, "IEEE Standard for Performance and Test Requirements for Instrument Transformers of a Nominal System Voltage of 115 kV and above" (IEEE C57.13.5, 2009)
- (10) D.S. Souza, H.A. Martins, R.S. Delgado, R.C. Menezes, "Medição de transitórios em transformadores de corrente, classe 550kV, gerados por manobras de seccionadores, SE Cuiabá - MT" (CEPEL, 2017)
- (11) Working Group D1.43 CIGRE "Insulation Degradation under Fast, Repetitive Voltage Pulses" (Technical Brochure 703, September 2017)
- (12) A. R. F. Freire, P. T. da Silva, A. V. Carvalho Jr., F. A. Filho, J. M. S. C. Costa, "Manobras de Chaves Secionadoras com Tensão e Solicitações de Alta Frequência nos Transformadores de Corrente" (Décimo Segundo Encontro Regional Ibero-americano do CIGRÉ – XII Eriac, Foz do Iguazu-PR, Brasil. 2007)
- (13) V. S. Rashkes, L. D. Ziles, "Very High Frequency Overvoltages at Open Air EHV Substations during Disconnect Switch Operations" (IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 11, No. 3, pp. 1618-1623. July 1996)
- (14) COBEI – Comitê Brasileiro de Eletricidade, Eletrônica, Iluminação e Telecomunicações, "Carta ao Chairman IEC/TC 38 Instrument Transformers" (COBEI, São Paulo. 8 de Novembro de 2018)
- (15) M. D. Del Pozo, D. A. Esteban, P. E. Issouribehere, G. A. Barbera, A. Funes, A. Ledesema. "Field measurements and modelling of high frequency transients during disconnect switch operations in EHV Substations. Assessment of their effects on Current Transformers" (Cigre A3 207. Paris. 2010)

(16) CIGRE AG D1.03 “Very Fast Transient Overvoltages (VFTO) in Gas-Insulated UHV Substations” (Brochura 519, CIGRE Technical Brochure 519, December 2012)

(17) E.P. Almeida, I.F. Verboonen, G.D. Pomar, H.A. Martins, D.S. Souza, R.S. Delgado, F.E. Spressola, J.G. Andrade, T.F. Neri, G.S. Luz “Efeito dos Transitórios Rápidos gerados por manobra de seccionador sobre transformadores de corrente tipo “Tpo-Core”” (IX Workspot, Foz do Iguaçu, Novembro de 2018).

11.0 - DADOS BIOGRÁFICOS



FLÁVIO EDUARDO SPRESSOLA, brasileiro, nascido em Jardinópolis – SP, é Mestre em Engenharia Elétrica (2011) pela UNIFEI e engenheiro eletricitista graduado pela mesma instituição em 1999. Trabalha na unidade Itajubá – MG da GE Grid Solutions desde 2000 onde atua na área de desenvolvimento de produto, sendo especialista em transformadores para instrumento. Antes de ingressar na área de desenvolvimento, atuou por mais de 10 anos com ensaios de alta tensão. Atualmente é doutorando em Engenharia Elétrica pela UNIFEI. É coordenador da ABNT/COBEI CE 003:038.001, comissão de estudos sobre transformadores para instrumento e, também especialista representante do Brasil no Comitê Técnico TC38 da IEC.



HELVIO JAILSON AZEVEDO MARTINS. Nascido em Nova Friburgo – RJ, em 1955. Graduado em Engenharia Elétrica (sistemas de potência) pela UFRJ, 1979, onde também obteve o grau de Mestrado em Engenharia Elétrica (Alta Tensão), 1987; e Doutorado em Engenharia Elétrica em 2007, desenvolvendo tese sobre monitoramento de deslocamentos geométricos de enrolamentos de transformadores de potência utilizando a resposta em frequência associada a algoritmos de inteligência artificial. Sua experiência profissional inclui a ex-PTEL-Projetos e Estudos de Engenharia, onde participou de estudos de planejamento da interligação do sistema elétrico brasileiro e projetos de subestações. No CEPEL desde 1985, atuava no desenvolvimento de técnicas de ensaios aplicados na avaliação de equipamentos elétricos de alta tensão, desenvolveu pesquisas relacionadas a métodos e técnicas para monitoramento, avaliação e diagnóstico de equipamentos elétricos. É autor de mais de 100 trabalhos, nacionais e internacionais, participando ativamente de alguns grupos de trabalho do Cigré. Desde 2018, atua como consultor independente, principalmente, na avaliação dos efeitos nos dielétricos de transformadores de potência e TIs, devido a manobras de seccionadores em AIS e GIS. É coordenador do Comitê de Estudos do Cigre CE A3 – Equipamentos de Alta Tensão e do WG A3.42 – Failure analysis of recent AIS instrument transformer incidentes.

JOSÉ GERALDO BARRETO MONTEIRO DE ANDRADE, brasileiro, nascido em São Paulo – SP em 1974. Possui Graduação (1999), Mestrado (2002) e Doutorado (2008) em Engenharia Elétrica pela Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Áreas de atuação: Simulação de Transitórios Eletromagnéticos e Eletromecânicos, confecção de modelos para estudos de estabilidade e de transitórios eletromagnéticos de FACTS, HVDCs, geradores eólicos e geradores térmicos utilizando os programas ANATEM, ATP, DigSilent e PSCAD. Trabalhou na ABB Consulting Brasil, como Coordenador Técnico, entre 2009 a 2016. Desde de 2016 trabalha na GE Energy Consulting, atualmente na função de Líder para a Região da América Latina.