



XXV SNPTEE
SEMINÁRIO NACIONAL DE PRODUÇÃO E
TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA

4377
GTM/18

10 a 13 de novembro de 2019
Belo Horizonte - MG

Grupo de Estudo de Transformadores, Reatores, Materiais e Tecnologias Emergentes-GTM

Banco de Transformadores Operando com Enrolamentos Abertos - Modelagem, Análise de Falha e Comparação de Resultados

**ULISSES ROBERTO REGISTRO MASSARO(1); FABIO VIEIRA(1);
ELETROSUL(1);**

RESUMO

A proposta deste trabalho é apresentar as análises realizadas para diagnóstico das causas de falha de um banco de transformadores durante uma intervenção onde o enrolamento em delta permaneceu com seus terminais abertos. São apresentadas análises analíticas e através de simulação, que foram realizadas com o auxílio do programa Alternative Transients Program (ATP), através da representação das unidades monofásicas dos transformadores, das respectivas capacitâncias entre enrolamentos e entre enrolamento e terra. A falha ocorreu em decorrência de sobretensões fase-terra que surgiram devido ao acoplamento capacitivo entre os enrolamentos primário, secundário, terciário e terra.

PALAVRAS-CHAVE

Transformadores, Operação, Enrolamentos em Aberto, Sobretensão, Ligação em delta

1.0 - INTRODUÇÃO

As unidades transformadoras de potência de grande porte são geralmente compostas de três unidades monofásicas que comumente possuem três enrolamentos que utilizam, na maioria dos casos, um esquema de ligação $Y_n/Y_n/D$. Em algumas condições especiais, podem ser verificadas a ligação $Y_n/D/D$. Em ambas as aplicações, o fechamento do delta ocorre fora dos transformadores, através de conexões rígidas, sejam elas barramentos tubulares, cabos ou barramentos blindados. Para realização de uma possível manutenção nessas conexões de fechamento do delta é necessário o desligamento do banco de transformadores, entretanto, surge a dúvida se é possível operar o banco de transformadores com os terminais dos enrolamentos em delta abertos (X_1 , X_2 ou Y_1 , Y_2) enquanto procede-se com os serviços de manutenção. A resposta nem sempre é conhecida pois depende da consideração dos efeitos das capacitâncias dos enrolamentos dos transformadores.

O objetivo deste informe é apresentar análises realizadas para compreensão de uma falha de transformador, ocorrido durante a implantação de uma subestação (SE) com participação da Eletrosul, que em virtude de atrasos na obtenção das licenças ambientais e, conseqüentemente, atraso da data de entrega da obra, houve a necessidade de realizar atividades de comissionamento em paralelo. Um imprevisto gerou a necessidade de desconectar o enrolamento secundário (X_1 , X_2) dos barramentos que faziam o fechamento do delta, de forma a garantir a segurança das equipes que trabalhavam nas conexões deste transformador. Por outro lado, foi necessário retornar com o transformador para o suprimento dos serviços auxiliares da SE, cuja fonte secundária era bastante precária. Ressalta-se que esse modo de operação foi acordado entre os proprietários e o fabricante do equipamento.

A falha ocorreu em decorrência de sobretensões fase-terra que surgiram devido ao acoplamento capacitivo entre os enrolamentos primário, secundário, terciário e terra. Tendo em vista a preservação do nome do fabricante e da instalação onde ocorreu a falha, este trabalho apresentará a metodologia utilizada para análise da falha, os aspectos da modelagem do banco de transformadores no programa ATP e os resultados obtidos. Esses resultados serão comparados às oscilografias obtidas durante a falha no equipamento.

2.0 - DESENVOLVIMENTO

A operação de bancos de transformadores ou autotransformadores monofásicos com enrolamentos ligados em delta exige sempre muita atenção, sobretudo com as tensões fase-terra que surgem nos terminais desses enrolamentos. Essas tensões podem ser extremamente elevadas e desbalanceadas dependendo da composição das capacitâncias entre os enrolamentos e entre enrolamentos e a terra. Por outro lado, as tensões fase-fase entre os terminais permanecem praticamente inalteradas. Esse assunto tem sido estudado pela Eletrosul em diversas oportunidades, especialmente quando associado a bancos de transformadores com unidades monofásicas de diferentes fabricantes e diferentes tipos de núcleos. [1]

O objeto deste artigo, conforme já mencionado, relata uma situação de falha após a desconexão dos enrolamentos secundários das unidades monofásicas de um banco de transformadores ligados em delta. Cabe salientar que essa forma de operação foi acordada com o fabricante do TF. A Figura 1A apresenta uma das fases do TF com as respectivas conexões durante a permanência do mesmo na forma de operação analisada neste artigo. Já a Figura 1B apresenta o diagrama unifilar da ligação do TF.

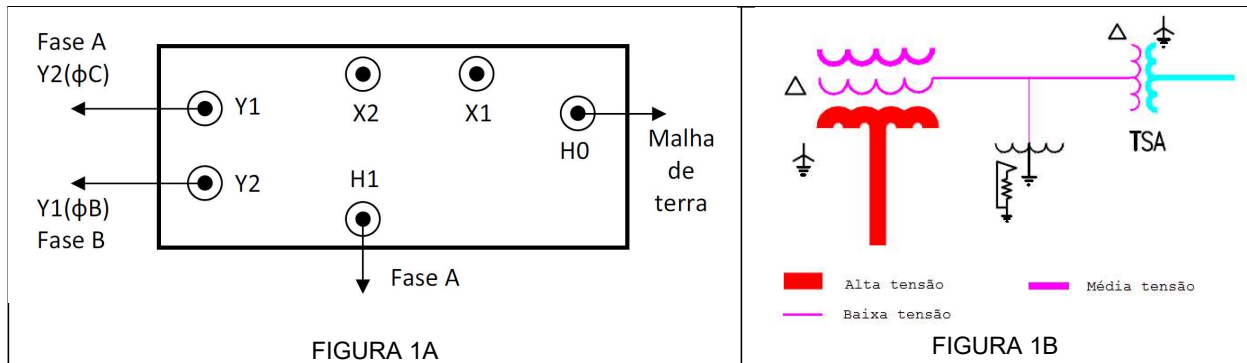


FIGURA 1 – Forma de ligação do Transformador durante a ocorrência

A Figura 1A apresenta a visão superior da fase A do TF e o esquema de ligação que a mesma ficou submetida, ou seja, o enrolamento de alta tensão (H1-H0) ficou conectado ao barramento de alta tensão e o enrolamento de baixa tensão (Y1-Y2) ficou suprindo as cargas do sistema de serviço auxiliar da referida SE, ambos os enrolamentos ficaram com suas conexões conforme previsto no projeto original da SE. Já o enrolamento de média tensão (X1-X2) ficou operando em aberto, ou seja, das suas referidas buchas não existiam nenhum tipo de conexão. Essa forma de conexão foi utilizada nas três fases do TF, conforme indicado na Figura 1B e ficou em operação por um período de aproximadamente uma semana.

Após a conclusão dos serviços no setor de média tensão o TF foi desligado para realizar as conexões externas dos enrolamentos de média tensão. Terminada as conexões e com a área liberada o TF foi energizado e houve a atuação da sua proteção, função 87, em virtude de um curto interno em duas das suas fases. A análise em campo confirmou o sinistro em uma das fases através de inspeção visual externa e, dias depois, através de inspeção interna, foi verificado danos em outra fase do TF provocados por curto-circuito na mesma. A conclusão das inspeções nas três fases do TF indicou a necessidade de enviar uma das fases à fábrica, além da limpeza geral e tratamento do óleo nas outras duas fases. O TF voltou a operar com a fase reserva substituindo a enviada a Fábrica. Foi solicitada uma análise da referida ocorrência ao setor de estudos da operação da Eletrosul no intuito de tentar entender o fenômeno e apontar possíveis causas.

3.0 - ANÁLISE ANALÍTICA DO MODO DE OPERAÇÃO

A operação do TF com um dos seus enrolamentos em aberto, neste caso o de média tensão, foi considerada como um fenômeno de regime permanente e analisada de forma analítica através do princípio da Superposição [2]. Considerando apenas as formulações básicas de transformadores através das relações de transformação, obtemos:

$$V_H = V_{H1} - V_{H0} \quad \text{e} \quad V_X = V_{X2} - V_{X1}$$

$$V_H = (N_H/N_X)V_X$$

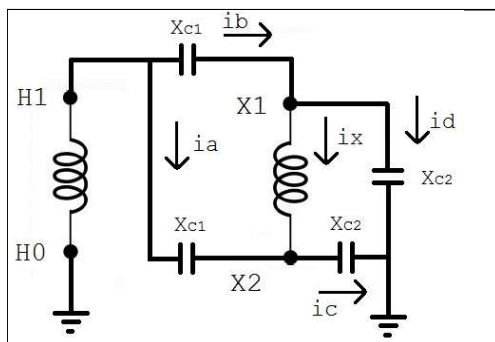
Onde:

$(N_H/N_X) = 20,2 \rightarrow$ relação entre as espiras do enrolamento de alta e média tensão.

Como $V_H = 525/\sqrt{3}$ kV (fase-terra) então a tensão secundária V_X fica com 15 kV entre seus enrolamentos (X1, X2) e induz ao erro de pensarmos que as tensões fase-terra ficam com o valor de $15/\sqrt{3}$ kV.

Entretanto, quando o efeito das capacitâncias entre os enrolamentos e entre os terminais do enrolamento à terra é considerado, na referida análise, a solução não é tão trivial.

A Figura 2 apresenta a representação do TF com o circuito magnético acrescido das capacitâncias entre enrolamentos (X_{C1}) e enrolamento-terra (X_{C2}). Nesta análise foi desprezada a influência do enrolamento de baixa tensão.



Onde:

X_{C1} – Reatância capacitiva entre os enrolamentos de alta e média tensão;

X_{C2} – Reatância capacitiva entre o enrolamento de média tensão e a terra.

H1 e H0 – Terminais do enrolamento de alta tensão.

X1 e X2 – Terminais do enrolamento de média tensão.

FIGURA 2 - Representação do TF operando com o enrolamento de média tensão em aberto

Os valores das reatâncias capacitivas X_{C1} e X_{C2} foram considerados como metade do valor informado nos testes de fábrica ($X_{C1} = 152,314 \text{ k}\Omega$ e $X_{C2} = 299,858 \text{ k}\Omega$)

Aplicando as leis dos nós nos pontos X_1 e X_2 temos:

$$ia + ix - ic = 0; \quad ib - ix - id = 0$$

Realizando a soma das duas equações de corrente acima, obtemos a equação (1).

$$ia + ib = ic + id \quad (1)$$

Pela lei de Ohm e considerando $V_{X2} = V_{X1} + V_x$, obtemos:

$$ia = (V_{H1} - (V_{X1} + V_x)) / X_{C1}; \quad ib = (V_{H1} - V_{X1}) / X_{C1};$$

$$ic = (V_{X1} + V_x) / X_{C2}; \quad id = V_{X1} / X_{C2};$$

Substituindo as leis de Ohms na equação (1) e isolando a incógnita V_{X1} , encontra-se a equação (2) que define V_{X1} em função das variáveis conhecidas V_{H1} , V_x , X_{C1} e X_{C2} .

$$V_{X1} = - \frac{V_x(X_{C1} + X_{C2}) - 2V_{H1}X_{C2}}{2(X_{C1} + X_{C2})} \quad (2)$$

Aplicando os valores das capacitâncias, da tensão primária e secundária na equação (2) é obtido um valor para V_{X1} igual a 273,6 kV pico fase-terra, que corresponde a aproximadamente 20 vezes mais que o valor nominal (fase-terra) deste enrolamento.

4.0 - ANÁLISE ATRAVÉS SIMULAÇÃO EM ATP DO MODO DE OPERAÇÃO

A análise através de simulação, utilizando o software ATP, foi realizada com o objetivo de representar fielmente o banco de transformadores a partir dos ensaios de fábrica de cada uma das unidades monofásicas. Desta forma, procedeu-se com a representação detalhada através da rotina TRANSFORMER do ATP utilizando as resistências e reatâncias, conforme Tabela 1, bem como, a característica de magnetização das unidades.

As capacitâncias indicadas na Tabela 1 não são consideradas na rotina TRANSFORMER, por este motivo, são representadas por capacitâncias concentradas para a terra e capacitâncias concentradas entre os enrolamentos.

Tabela 1 – Parâmetros Elétricos por fase

Resistências (Ohm)	R_p	R_s	R_t
Reatância (Ohm)	X_p	X_s	X_t
Capacitância para terra (microF)	H1-T	X1-T, X2-T	Y1-T, Y2-T
Capacitância entre enrolamentos (microF)	H1-X1, H1-X2 H1-Y1, H1-Y2	X1-Y1, X2-Y1 X1-Y2, X2-Y2	---

Onde: p – enrolamento primário; s – enrolamento secundário; t – enrolamento terciário; T - Terra
Capacitâncias identificadas conforme a Figura 1A

A modelagem do TF no programa ATP foi validada através das comparações dos seus resultados com os testes de curto e a vazio do TF. Após a validação foi iniciada as simulações que estão apresentadas a seguir.

4.1 Resultado das Simulações

Os resultados das simulações executadas no ATP seguem a cronologia utilizada na análise do problema de forma analítica.

4.1.1 Sem considerar as capacitâncias entre enrolamentos e enrolamento-terra.

Os resultados das tensões de alta e média tensão são apresentados nas Figuras 3. Neste caso é possível verificar que as tensões do terminal X1 são consideradas zero e as tensões do terminal X2 possuem o valor de 21,4 kVpico (15,1 kVef), valores que estão dentro da suportabilidade de tensão do equipamento e induz o analista a pensar que não há riscos a operação do TF.

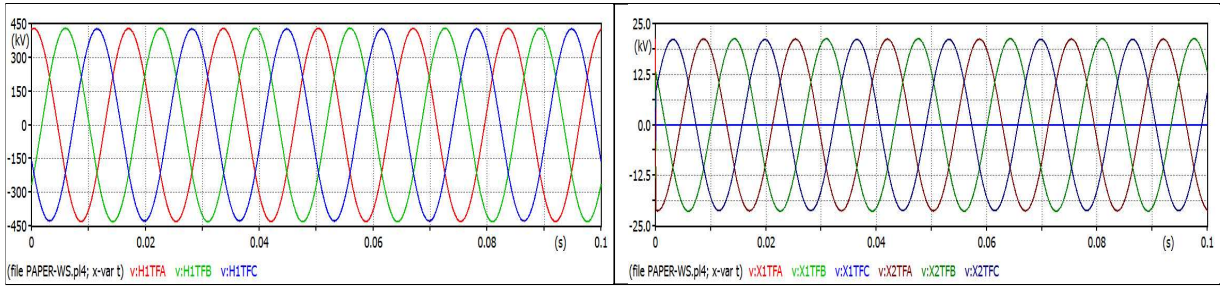


FIGURA 3 – Tensão na Alta e Média tensão, sem modelagem das capacitâncias

4.1.2 Considerando as capacitâncias entre enrolamentos e enrolamento-terra.

Os resultados das tensões de alta e média tensão são apresentados nas Figuras 4. Neste caso é possível verificar que as tensões do terminal X1 e X2 possuem os valores muito elevados, na ordem de 280,0 kVpico, valores que estão muito acima da suportabilidade de tensão deste equipamento.

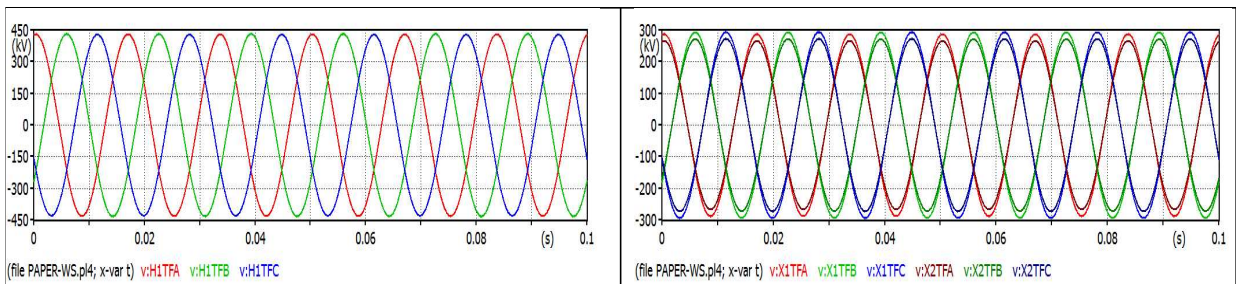


FIGURA 4 – Tensão na Alta e Média tensão, com a modelagem das capacitâncias.

Com os resultados obtidos nas simulações é possível verificar que os mesmos são condizentes com os resultados da análise analítica, tanto para a análise com ou sem a presença das capacitâncias.

4.2 Solução do problema

A operação de transformadores com um de seus enrolamentos em aberto, pode provocar danos e/ou curto-circuito interno no equipamento, conforme verificado analiticamente e através de simulações no programa ATP. Caso seja necessário operar o transformador com esse tipo de configuração, uma solução simples e quase sem custos é o aterramento de um dos terminais do enrolamento que deve operar desconectado, assim, o enrolamento fica “conectado” como estrela aterrado.

A Figura 5 apresenta o aterramento dos terminais X2 do enrolamento de média tensão e a sua esquerda, uma modificação na figura para visualizar a operação como estrela aterrado.

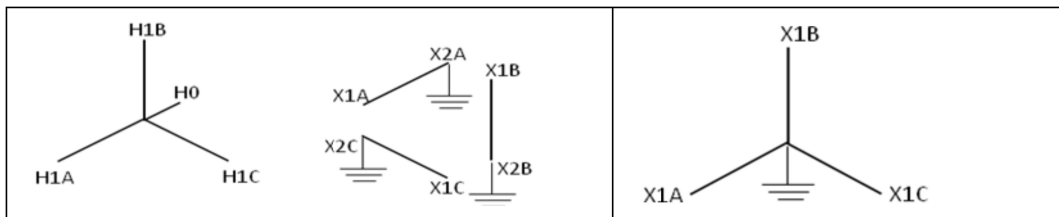


FIGURA 5 – Aterramento de um terminal do enrolamento que está operando em aberto

Na análise analítica é fácil calcular as tensões no terminal aberto X1. Como $V_x = 15 \text{ kVef}$ e $V_{x2} = 0 \text{ Vef}$ então, pela fórmula $V_x = V_{x2} - V_{x1}$; temos que $V_{x1} = -15 \text{ kVef}$.

A Figura 6 apresenta os valores da simulação do ATP.

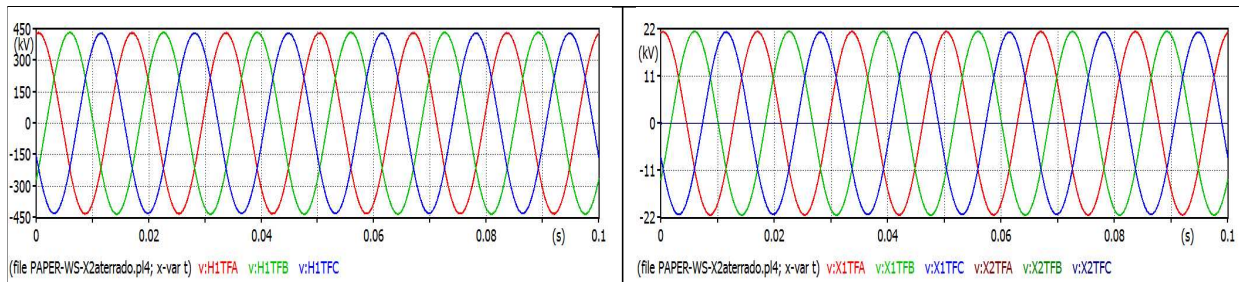


FIGURA 6 – Tensão na Alta e Média tensão, com a modelagem das capacitâncias e aterramento do X2.

Cabe salientar que as tensões no enrolamento do terciário não possuem modificações significativas quando comparamos as três formas analisadas (sem modelagem das capacitâncias, com a modelagem das capacitâncias e com um terminal aterrado).

5.0 - COMPARAÇÃO DOS REGISTROS OSCILOGRÁFICOS COM A SIMULAÇÃO NUMÉRICA

Após a realização das pendências no setor de média tensão, foi solicitado o desligamento do TF para realizar as devidas conexões dos terminais X1 e X2 ao setor de média tensão da SE, feito às conexões o TF foi liberado para voltar a operação. No momento da energização do TF foi verificada a atuação da proteção diferencial do mesmo. A Figura 7 apresenta a oscilografia das correntes da alta tensão no momento da energização, as correntes anteriores ao tempo t_i e após o tempo t_f são ruídos da oscilografia. A energização ocorreu normalmente entre o tempo (t_i e o t_{ic}) 370 ms, o primeiro pico de corrente (i_1) possui um valor de 360 A. No instante de tempo t_{ic} houve o início do sinistro com correntes (i_2) na ordem de 1265 A. O curto-circuito ficou mantido por aproximadamente 59 ms ($t_f - t_{ic}$) até o momento da abertura dos disjuntores do TF.

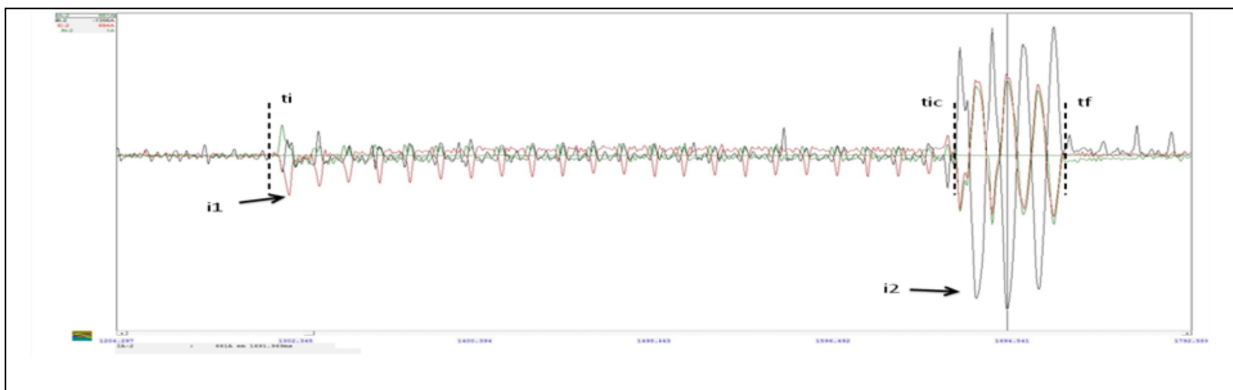


FIGURA 7 – Corrente do enrolamento de alta tensão, proteção do TF.

Inspecções realizadas nas unidades transformadoras constataram rompimento na isolação do enrolamento nas fases B e C, localizada na conexão do enrolamento com as buchas X1.

No intervalo de tempo entre t_i e t_{ic} a energização ocorreu sem problemas, mas é muito possível que já existisse o rompimento da isolação (curto-circuito) em uma das fases, fato que não provoca problemas na operação do TF, apenas provoca o deslocamento do neutro de média tensão para o valor da tensão do terminal X1 com o possível curto.

Com a oscilografia do sinistro e a modelagem do TF no ATP, foram realizadas análises para tentar reproduzir o ocorrido.

Os resultados da simulação das correntes de inrush retratam bem o que pode ter acontecido na energização do TF, conforme visualizado na Figura 8. Os valores de i_1 e i_2 nessa figura são 418 A e 1215 A, respectivamente.

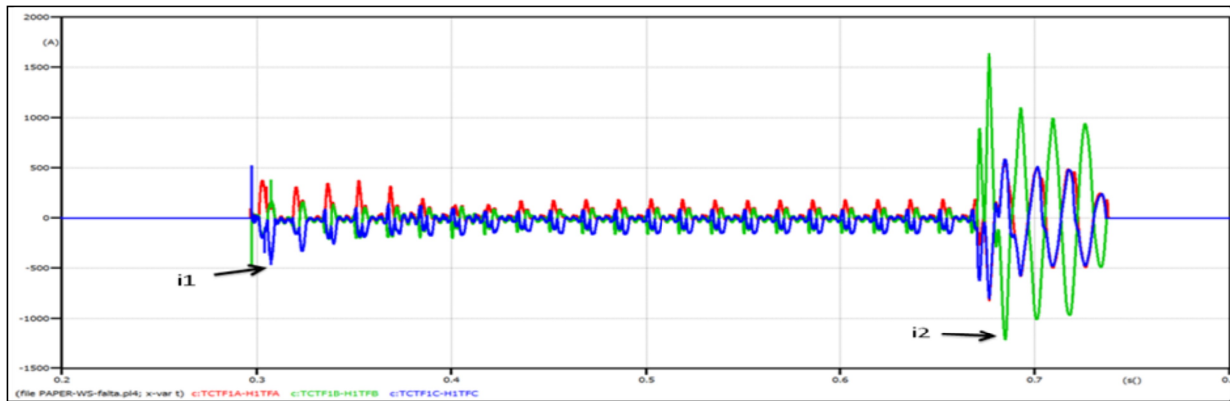


FIGURA 8 – Resultados da simulação do sinistro do TF – correntes do terminal de alta tensão.

A simulação no ATP considerou os resistores de pré-inserção dos disjuntores da alta tensão do TF, os tempos de fechamento do contato dos resistores de pré-inserção e do contato principal foram obtidos a partir das informações do fabricante. Foi considerada a existência de um curto-circuito entre o terminal X₁ da fase C e a terra antes e durante o processo de energização do TF, com resistência de 0,08 Ω. O aparecimento das correntes de curto-circuito é decorrente da modelagem de um curto-circuito entre o terminal X₁ da fase B e a terra, com resistência de 0,08 Ω.

Não houve a comparação das formas de onda de tensão, pois as mesmas não são monitoradas na proteção do TF.

6.0 - CONCLUSÕES

Conforme verificado neste documento, a operação de transformadores com enrolamentos em aberto pode provocar sérios danos ao mesmo. Para realizar uma análise desse modo de operação devem-se considerar, necessariamente, as capacitâncias entre enrolamentos e as capacitâncias entre enrolamentos e terra, pois se as mesmas não forem consideradas os resultados não refletem a realidade.

Verificou-se que a modelagem do transformador no programa ATP, com a representação de suas capacitâncias, ficou de acordo com a análise analítica da operação do TF com enrolamento em aberto. A simulação do sinistro no programa ATP conseguiu reproduzir a ocorrência, fato que confirma a boa qualidade da modelagem do transformador utilizada.

Por fim, caso seja necessário operar um transformador com o enrolamento aberto recomenda-se aterrar uma das extremidades deste enrolamento para evitar danos ao mesmo.

7.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Antunes, Ricardo ; et al. – “ Desequilíbrio de Neutro e Sobretensões na Área Terciária Ligada em Delta de Subestações” – XX SNTPEE – Novembro de 2009 – Recife – PE.
- [2] Allan Greenwood – “Electrical Transients in Power Systems” – Wiley-Interscience – 1971.
- [3] Test Report do Transformador – Testes de Fábrica

8.0 - DADOS BIOGRÁFICOS

Ulisses Roberto Registro Massaro

Nascido em 11/07/1978 em Maringá – PR.

Graduado em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Santa Catarina – SC, 2001.

Mestrado em Sistema de Potência pela Universidade Federal de Santa Catarina – SC, 2003.

Engenheiro na área de Estudos Elétricos de Operação da ELETROSUL – a partir de 2002.

Fabio Vieira

Nascido em 07/05/1973 em Florianópolis – SC.

Graduado em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Santa Catarina – SC, 1999.

Mestrado em Sistema de Potência pela Universidade Federal de Santa Catarina – SC, 2002.

Engenheiro na área de Estudos Elétricos de Operação da ELETROSUL – a partir de 2002.