

Cabos de Alta Tensão do Tipo OF (Oil Filled) - Determinação dos Tempos de Espera

E.W. Citron-CTEEP, W.R. Bacega-CTEEP

H. Tatizawa IEE/USP, P.F. Obase IEE/USP, N.M. Matsuo consultor IEE/USP

Resumo- Esta pesquisa tem por objetivo o estudo dos cabos de alta tensão do tipo OF (tensão nominal de 138kV e 345kV), na situação de desenergização ou desconexão da fonte de tensão, de forma a subsidiar o estabelecimento de eventuais novos tempos de espera para o aterramento do cabo e equipamentos associados, tendo em vista o aspecto de segurança das equipes de manutenção e operação envolvidas e as demais instalações associadas. Os trabalhos direcionaram-se no sentido de avaliar de forma quantitativa a carga elétrica residual, e para tanto foram desenvolvidos meios para a medição do tempo de descarga de forma a não interferir na constante de tempo do circuito considerado, utilizando-se para tal finalidade um divisor de tensão capacitivo adaptado para medições em corrente contínua. Adicionalmente, foram realizados estudos de modelagem e simulações computacionais envolvendo as instalações objetos do estudo, com a utilização do programa ATP – Alternative Transients Program, de forma a se incrementar o domínio técnico e teórico sobre os fenômenos envolvidos e possibilitar análises mais elaboradas sobre o resultados das medições.

Palavras-chave— aterramento, cabos oil filled, cabos de potência subterrâneos.

I. INTRODUÇÃO

Considerando-se situações normalmente presentes durante a operação do cabo OF, os mesmos podem ser desconectados da fonte de tensão em situações em que quase não haja nenhuma carga ou equipamento conectado ao cabo. Nessa situação, é importante o conhecimento da carga eletrostática residual do cabo, e de seu tempo de descarga, para assegurar a segurança das pessoas envolvidas na operação e manutenção do cabo, e do equipamento associado. Adicionalmente, o conhecimento do tempo de descarga permitirá otimizar o tempo despendido na manutenção do cabo, melhorando a disponibilidade da linha de transmissão subterrânea associada ao cabo OF, e consequentemente melhorando os índices de qualidade de energia da empresa.

Neste artigo, são apresentados as avaliações e os resultados alcançados, envolvidos os vários tipos de instalações que utilizam cabos do tipo OF estudados

no decorrer desse projeto de pesquisa.

II. TIPOS DE INSTALAÇÃO CONSIDERADAS NO TRABALHO

Nessa pesquisa, algumas configurações típicas que utilizam cabos do tipo OF, e demais equipamentos associados, foram escolhidas para estudo, por exemplo, circuitos com cabos longos, circuitos com cabos curtos, etc.. Neste artigo serão apresentados resultados referentes a 4 tipos de instalações submetidos ao estudo.

II.1 - Cabo longo, com e sem reator

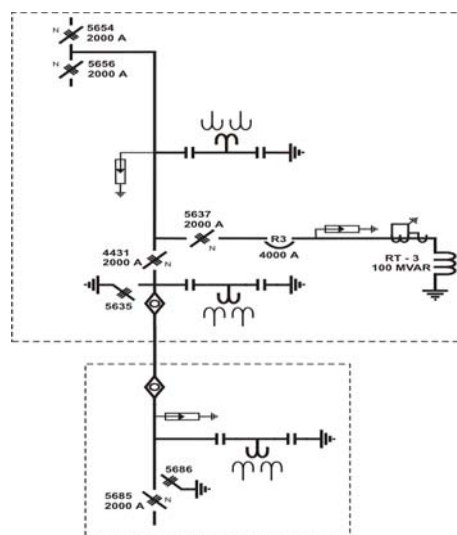


FIGURA 1 – Configuração típica – cabo longo com/sem reator.

Essa configuração consiste de três circuitos trifásicos, com comprimento de 8,5km de cabo OF, por fase, tensão nominal 345kV potência 500MVA por circuito. Potência do reator 100MVAR, utilizado principalmente para a compensação de reativos. Nessa configuração, no caso de desligamento do cabo, o reator pode prover um caminho para terra, e a carga residual do cabo pode ser drenada ao longo de alguns segundos ou minutos.

II.1.1 - MEDIÇÃO DO PERFIL DE TENSÃO APÓS DESLIGAMENTO DO CABO OF, COM REATOR LIGADO

Na FIGURA 2, um exemplo de medição do perfil de tensão após o desligamento é apresentado. Para a medição, foram utilizados divisor de potencial capacitivo associado a registrador de tensão

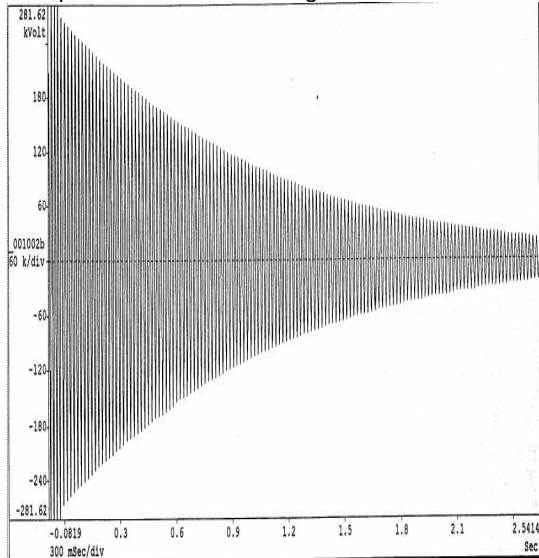


FIGURA 2 – Medição do perfil de tensão após desligamento do cabo OF, com o reator conectado. [1].

No caso da desconexão do cabo sem a presença do reator (por exemplo, durante um período de manutenção do reator), o caminho para o escoamento da carga residual do cabo OF é constituído somente pelas perdas da isolação do cabo e dos equipamentos associados (transformadores de instrumento, equipamentos de manobra, pára-raios, etc.). Essas perdas, normalmente são, ou podem ser, muito baixas, e de difícil quantificação geralmente, considerando as condições presentes em campo. No caso de perdas muito baixas, uma ilustração qualitativa do perfil de tensão esperado é mostrada na FIGURA 4

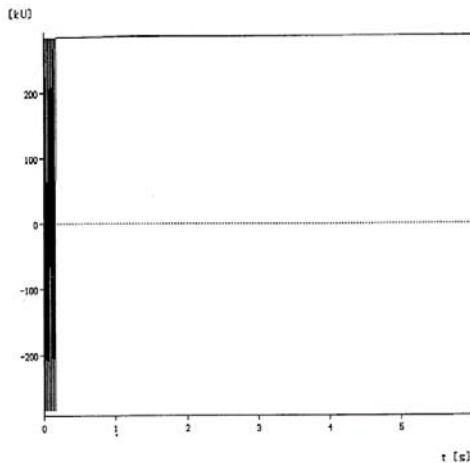


FIGURA 4 – Perfil de tensão residual esperado, após a desconexão do cabo da fonte de tensão, sem reator, considerando equipamentos associados com baixas perdas.

II.1.2 - MEDIÇÃO DO PERFIL DE TENSÃO APÓS DESLIGAMENTO DO CABO OF, COM REATOR DESCONECTADO.

Para essa medição, tendo em vista o perfil de tensão esperado da FIGURA 4, foi utilizado um divisor de potencial capacitivo, utilizando-se no braço secundário do divisor um voltímetro eletrostático, a fim de se prover uma altíssima impedância para o sinal do divisor de tensão capacitivo. Dessa forma, possibilita-se a medição de tensões em corrente contínua, e sem alterar significativamente a constante de tempo do circuito a ser medido.

Na FIGURA 5, apresenta-se esquematicamente a montagem utilizada para a realização das medições.

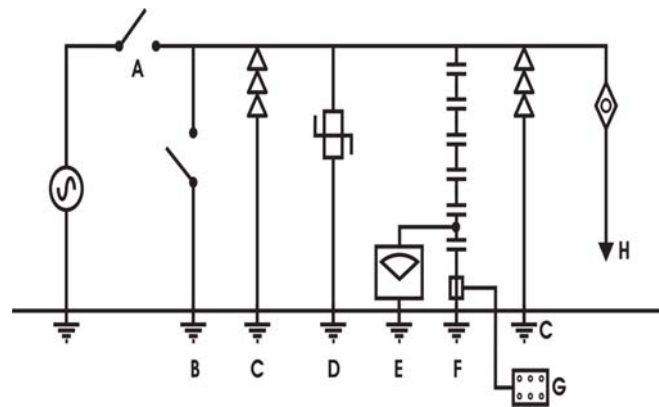


FIGURA 5 – Montagem utilizada para a realização das medições onde:

- A – Seccionador
- B – Seccionador de aterramento
- C – Isolador
- D – Pára-raios
- E – Voltímetro eletrostático
- F – Divisor de potencial capacitivo
- G – Sistema de Medição de Transitórios Nicolet
- H – LTS – cabo OF

Na FIGURA 6, estão representados os resultados das medições efetuadas. Os valores apresentados no gráfico referem-se aos valores eficazes de tensão medidos.

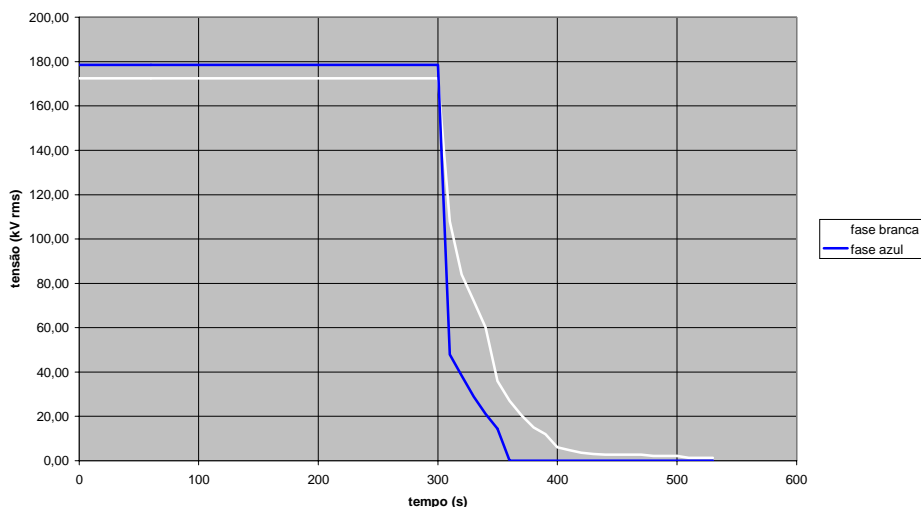


FIGURA 6 – Medição da tensão residual, após desligamento do cabo OF, sem reator, fases Azul e Branca.

II.1.3 - DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Considerando os dados do cabo OF:

- diâmetro do condutor : $d = 43,63\text{mm}$
- diâmetro sobre a isolamento (papel-óleo): $D = 81,33\text{mm}$
- comprimento da LTS, por fase: $L = 8500\text{m}$
- permissividade relativa da isolamento: 3,3
- permissividade do vácuo: $8,85 \cdot 10^{-12} \text{ F/m}$
- tensão nominal da LTS 345kV (entre fases)
- tensão nominal da LTS 200kV (fase-terra)

Cálculo da capacitância (C) do cabo:

$$C = \frac{2\pi\epsilon\epsilon_0}{\ln\frac{D}{d}} \cdot L$$

$$C = \frac{2\pi \cdot 8,85 \cdot 10^{-12} \cdot 3,3}{\ln\frac{81,33}{43,63}} \cdot 8500$$

Capacitância do cabo, por metro:

$$C = 294,5\text{pF/m}$$

Capacitância total do cabo:

$$C = 2,5\mu\text{F}$$

Estimativa da carga elétrica armazenada no cabo no instante do desligamento:

$$Q = C \cdot V = 2,5 \cdot 10^{-6} \cdot \frac{345 \cdot 10^3 \cdot \sqrt{2}}{\sqrt{3}}$$

$$Q = 0,705 \text{ Coulombs}$$

Estimativa do tempo de descarga, considerando que a carga elétrica se escoar na forma de corrente de fuga, originada pela presença de dois pára raios (instalados em ambas extremidades do cabo), e também por correntes de fuga presentes nas superfícies dos quatro isoladores de porcelana tipo pedestal e das duas buchas de porcelana dos terminais do cabo. Dessa forma, considerando uma corrente de fuga total constante, hipotética, de 3mA:

$$i = \frac{\Delta Q}{\Delta t} \Rightarrow \Delta t = \frac{0,705}{3 \cdot 10^{-3}} \Rightarrow \Delta t = 235 \text{ s} = 3,9 \text{ min}$$

Portanto, o tempo de descarga estimado nessas condições é de 3,9 minutos.

Estimativa da energia acumulada no cabo OF, sob a forma de carga eletrostática acumulada, no instante do desligamento (considerando tensão no instante do desligamento de 181,5kV):

$$E = \frac{1}{2} \cdot C \cdot V^2 = \frac{1}{2} \cdot 2,5 \cdot 10^{-6} \cdot (181,5 \cdot 10^3)^2 = 41,2 \text{ kJ}$$

Estimativa da energia acumulada no cabo OF, sob a forma de carga eletrostática acumulada, após 330s:

$$E = \frac{1}{2} \cdot C \cdot V^2 = \frac{1}{2} \cdot 2,5 \cdot 10^{-6} \cdot (13 \cdot 10^3)^2 = 211 \text{ J}$$

Portanto, essa análise indica que após 330s do desligamento da LTS, 99,5% da energia inicial armazenada no cabo OF já se teria escoado.

Logo, o tempo estimado considerando essas condições de contorno estão, aproximadamente, concordes com as medições efetuadas, as quais indicam um tempo de 330s para uma tensão residual de 13kV

A FIGURA 7 apresenta simulação em ATP, considerando as perdas por corrente de fuga estimada de 3mA.

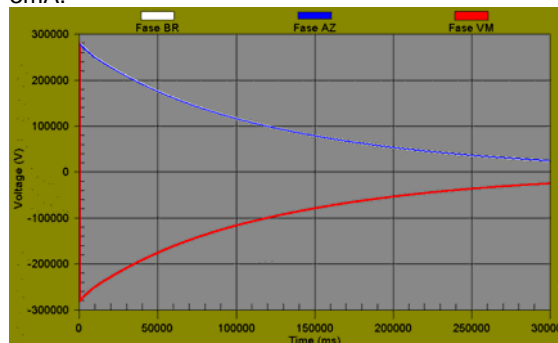


FIGURA 7: Simulação em ATP – Desligamento da LTS Xavantes Bandeirantes, sem a presença de reator, considerando as perdas do circuito.

II.1.3 - CONCLUSÕES

As conclusões que podem ser extraídas com as informações disponíveis indicam que, considerando as condições de contorno apresentadas, devem-se esperar diferentes comportamentos quanto ao perfil de tensão residual esperado no desligamento desses cabos OF. Dessa forma, devem ter grande influência as características individuais de corrente de fuga, em sua componente resistiva, observada na superfície dos terminais do cabo OF, nos isoladores, nos seccionadores, superfície externa dos pára-raios, e em superfícies externas de equipamentos associados em paralelo com o cabo durante a desenergização, situados em ambas extremidades do cabo OF. A soma das contribuições de todos esses equipamentos, com suas respectivas correntes de fuga, devem, provavelmente, determinar o perfil de tensão residual final.

Dessa forma, conforme as condições de contorno apresentadas, uma explicação plausível para o comportamento da curva de descarga medida seria através das correntes de fuga nos equipamentos associados.

II.2 – Cabo OF ligado a banco de capacitores

Outro tipo de instalação objeto de estudo constituiu-se num banco de capacitores, potência 28,8MVA, tensão 88kV. O diagrama esquemático da montagem para a realização das medições é apresentado na FIGURA 8.

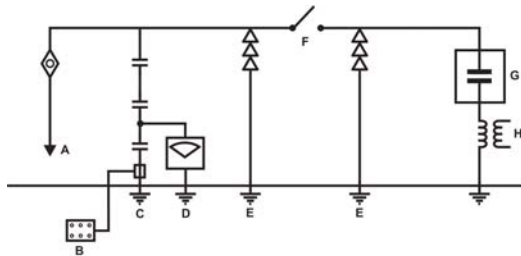


FIGURA 8 – Montagem utilizada para a realização das medições onde:

- A – LIE – cabo OF
- B – Sistema de Medições de Transitórios Nicolet
- C – Divisor de potencial capacitivo
- D – Voltímetro eletrostático
- E – Isolador
- F – Seccionador
- G – Banco de capacitores BCA2 – 28,8MVA, 88kV
- H – Transformador de potencial

O resultado das medições é apresentado na FIGURA 9, confrontado com o resultado teórico esperado fornecido pela modelagem e simulação utilizando o programa ATP. Esses resultados indicam um tempo de decaimento da tensão residual de aproximadamente 4 minutos. Ressalta-se o elevado grau de concordância entre a medição e a simulação computacional.

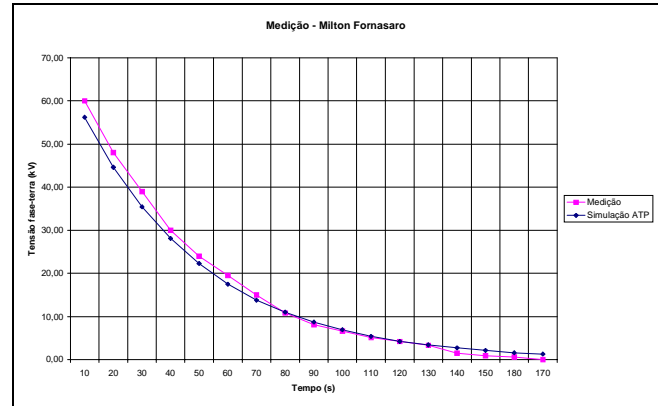


FIGURA 9 – Comparação entre valores medidos e valores calculados na simulação empregando o programa ATP, para a tensão residual na fase branca.

O resultado das medições realizadas e das simulações utilizando o ATP estão compatíveis, indicando plausibilidade da modelagem.

Adicionalmente, as medições indicam que as características do dispositivo de descarga do banco de capacitores atendem aos requisitos do item 5.4 da norma NBR - 5282 – “Capacitores de potência em derivação para sistema de tensão nominal acima de 1000V – Especificação” [4], os quais prescrevem um tempo de descarga máximo de 5 minutos.

Através das medições e das simulações realizadas, pode-se concluir que os parâmetros determinantes do perfil de tensão residual para a situação de desligamento do cabo OF associado a banco de capacitores é determinado pela capacitância do banco de capacitores e pela resistência dos elemento dissipadores.

II.3 – CABO OF LIGADO A BANCO DE TRANSFORMADORES

A FIGURA 10 apresenta a configuração cabo OF ligado a banco de transformadores.

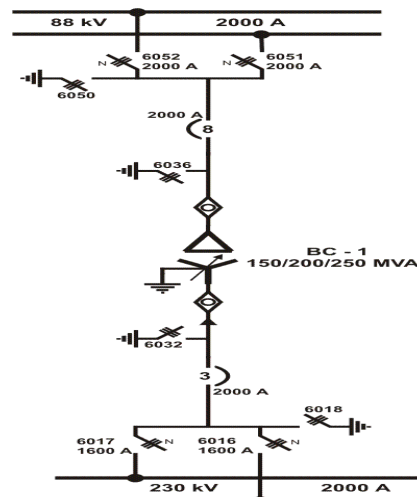


FIGURA 10 – trecho da LIE CB – BANCO 1 230, da subestação Centro, a ser considerado na modelagem.

Observa-se que na ligação do cabo OF com o transformador, no lado da ligação em delta, não se observa caminho para a Terra para o escoamento das cargas residuais do cabo OF.

As FIGURAS 11 e 12 apresentam resultados das medições e das simulações computacionais. Observa-se, além da concordância entre resultado teóricos previstos pela modelagem e simulação computacional e resultados das medições, um tempo muito rápido de decaimento das tensões residuais.

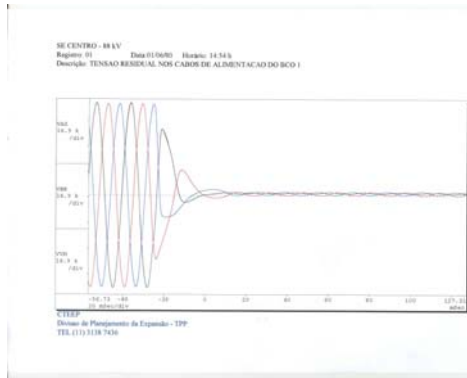


FIGURA 11 – Tensão residual nos cabos de alimentação do Banco de Transformadores 1 230kV/88kV - SE Centro – medição efetuada com o Sistema de Medição de Transitórios Nicolet – detalhe do instante de desligamento- tensões de fase no lado de 88 kV

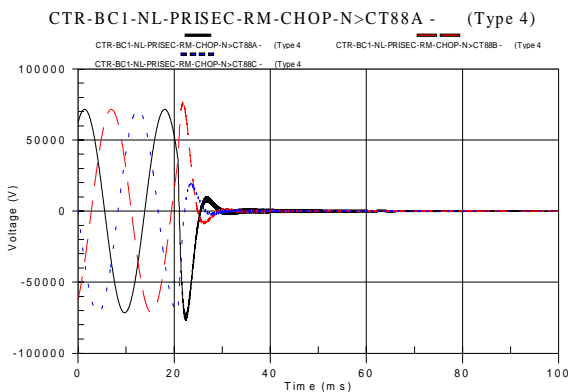


FIGURA 12 – Simulação no ATP - Desenergização do banco de transformadores BC-1 de 230/88 kV da Subestação Centro - Abertura antes da passagem pelo zero - tensões de fase no lado de 88 kV

O resultado das medições, com elevado grau de concordância com os resultados da modelagem e simulações utilizando o programa computacional ATP indicam tempos para o decaimento das tensões residuais muito curtos, da ordem de frações de segundos para o circuito LIE CB – Banco de Transformadores 1 da SE Centro.

III. – CONCLUSÕES E RESULTADOS ALCANÇADOS

O desenvolvimento deste projeto de pesquisa, considerando o objetivo final do estabelecimento dos tempos de espera após o desligamento dos equipamentos conectados por meio de cabo OF, levou a um incremento no conhecimento sobre os parâmetros e variáveis importantes que afetam o comportamento da tensão residual na desenergização desses cabos e dos equipamentos associados, considerando-se alguns dos principais tipos de instalações existentes.

Foram definidos no início do projeto 7 tipos de circuitos considerados representativos das situações mais importantes para estudo.

A partir do levantamento de dados no cadastro da empresa e de informações obtidas em campo e na literatura, foi feita a modelagem desses circuitos para posterior simulação computacional utilizando o programa ATP.

Com a finalidade de validar e aperfeiçoar a modelagem, foram desenvolvidos novos procedimentos de medição, que permitiram a medição do perfil de tensão residual dos cabos OF na situação de circuito predominantemente capacitivo, situação na qual o perfil de tensão residual esperado assemelha-se à descarga bastante lenta de um capacitor (constituído pelo cabo OF). Cuidados foram tomados para não alterar significativamente a constante de tempo do circuito.

Através desse levantamento de dados, dos trabalhos de modelagem e de simulação, e de medições de campo, foi possível um incremento no domínio técnico e teórico dos fenômenos envolvidos. Uma das conclusões mais significativas, proporcionadas pelos estudos e medições realizadas, constitui-se na percepção de que as constantes de tempo envolvidas na desenergização do cabos OF estudados são significativamente menores do que os tempos de espera atualmente praticados.

IV. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] COFTR001/NT001/OR - Levantamento dos dados disponíveis dos cabos e instalações, e estudos correlatos, Relatório Técnico, IEEUSP/CTEEP, setembro de 2002.
- [2] ATP – Alternative transients program – Rule Book, Bonneville Power Administration, 1987
- [3] COFTR001/NT003/OR – Modelagem e simulação do perfil de tensão residual em linhas de transmissão subterrâneas (LTS) e em linhas de interligação de equipamentos (LIE) – Estudos de casos, Relatório Técnico, IEEUSP/CTEEP, março de 2003
- [4] NBR5282 – Capacitores de potência em derivação para sistema de tensão nominal acima de 1000V – Especificação, ABNT, 1998