



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

GSC - 01
16 a 21 Outubro de 2005
Curitiba - Paraná

**GRUPO X
GRUPO DE ESTUDO DE SOBRETENSÕES E COORDENAÇÃO DE ISOLAMENTO - GSC**

**CÁLCULO DE SOBRETENSÕES TRANSITÓRIAS DE ALTA FREQUÊNCIA EM SUBESTAÇÕES ISOLADAS
A SF₆ ATRAVÉS DE SIMULAÇÕES DIGITAIS COM O EMTP/ATP**

Francisco Salgado Carvalho * Roberto Vaisman Rogério Magalhães Azevedo

CEPEL - Centro de Pesquisas de Energia Elétrica

RESUMO

Nas subestações isoladas a SF₆, as chaves seccionadoras manobram freqüentemente pequenas correntes capacitivas que fluem a partir de trechos de barramentos. Tendo em vista que a velocidade de operação destas seccionadoras é baixa, se comparada com a velocidade de operação dos disjuntores, e que o SF₆ é um gás eletronegativo, ocorre um grande número de interrupções prematuras da corrente entre seus contatos, seguidas de reacendimentos, antes que a sua abertura ou seu fechamento sejam mecanicamente completados.

Como nestas subestações as distâncias entre os diferentes equipamentos é mais curta, se comparada com as subestações convencionais, cada um destes reacendimentos provoca o aparecimento de sobretensões transitórias de alta freqüência, definidas pela NBR 6949 como sobretensões de frente muito rápida.

O objetivo deste trabalho é descrever, de forma teórica, como são formadas as sobretensões de frente muito rápida, que aparecem nas subestações isoladas a SF₆, além de mostrar como esta formação poderá ser reproduzida através de simulações digitais.

O trabalho mostra também como deve ser feita a modelagem dos diferentes componentes internos e externos das subestações isoladas a SF₆ de forma a se realizar simulações digitais com o programa EMTP/ATP, visando o cálculo das sobretensões de frente muito rápida.

PALAVRAS-CHAVE

Chaves seccionadoras, Coordenação do isolamento, EMTP/ATP, Simulações digitais, Sobretensões de frente muito rápida, Subestações isoladas a SF₆

1.0 - INTRODUÇÃO

Os fenômenos transitórios em sistemas de potência são causados por operações de manobra, faltas e outros distúrbios, tais como descargas atmosféricas. Eles aparecem dentro de uma larga faixa de freqüências que variam de C.C. a muitos MHz. Uma distinção é feita entre os transitórios eletromecânicos (mais lentos) e os transitórios eletromagnéticos (mais rápidos). Estes últimos podem ocorrer numa escala de tempo que vai de microssegundos a muitos ciclos. Devido ao comportamento dependente da freqüência dos diversos componentes encontrados em um sistema de potência e a conseqüente dificuldade de se desenvolver modelos para estes componentes que sejam precisos para uma larga faixa de freqüência, os fenômenos eletromagnéticos são classificados em diferentes grupos. Uma precisa representação matemática pode então ser proposta e desenvolvida para uma faixa de freqüência específica, para que na prática se possa simular de forma digital estes transitórios. As chamadas sobretensões de frente muito rápida, segundo classificação da ABNT (1), pertencem à faixa de freqüência mais alta dos transitórios encontrados nos sistemas de potência. De acordo com a classificação proposta pelo CIGRE

* Avenida Um s/n - Cidade Universitária - CEP 21941-590 - Rio de Janeiro - RJ - BRASIL
Tel.: (55) - (21) 2598-6463 - Fax: (55) (21) 2270-4189 - e-mail: fsalgado@cepel.br

WG 33-02 (2), a faixa de frequência apresentada por estas sobretensões varia de 100 kHz a 50 MHz. De acordo com a IEC 60071-1 (3), a forma destas sobretensões de frente muito rápida "é usualmente unidirecional com tempo de pico $\leq 0,1 \mu\text{s}$, duração total $\leq 3 \text{ ms}$ e contém oscilações superpostas apresentando frequências de $30 \text{ kHz} < f < 100 \text{ MHz}$ ". Na prática, pode-se considerar que a denominação sobretensão de frente muito rápida é restrita a transitórios com frequência acima de 1 MHz. Segundo a IEC 60071-2 (4), muitas causas poderão dar origem a sobretensões de frente muito rápida nos sistemas de potência, tais como: operação de seccionadoras e faltas no interior de subestações isoladas a SF₆, chaveamento de motores e transformadores com conexões curtas em relação a outros equipamentos e barramentos e certas condições de descargas atmosféricas.

Nas subestações isoladas a SF₆, as seccionadoras manobram freqüentemente pequenas correntes capacitivas que fluem a partir de trechos de barramentos. Tendo em vista que a velocidade de operação destas seccionadoras é baixa, se comparada com a dos disjuntores, e que o SF₆ é um gás eletronegativo, ocorre um grande número de interrupções prematuras da corrente entre seus contatos, seguidas de reacendimentos, antes que a sua abertura ou seu fechamento sejam mecanicamente completados. Como nestas subestações as distâncias entre os diferentes equipamentos são curtas, se comparadas com as subestações convencionais, cada um destes inúmeros reacendimentos causa o aparecimento das sobretensões transitórias de alta frequência que podem se constituir em uma forma adicional de solicitação sobre os equipamentos (além das sobretensões de manobra e atmosféricas, normalmente consideradas) acoplados à subestação.

Desta forma, é recomendável a sua determinação através de simulações digitais ou de medições de campo. A realização de medições de campo é trabalhosa e custosa, além de só poder ser feita depois que a subestação estiver em operação. Quanto às simulações digitais, é preferível que sejam realizadas por ocasião da concepção da subestação, através de um trabalho conjunto com o fabricante dos equipamentos a SF₆, principalmente se existirem transformadores de potência conectados a uma subestação E.A.T. a SF₆. Esta precaução é justificada porque se suspeita que os transformadores E.A.T. possam vir a falhar nestas circunstâncias, dependendo de seu projeto.

É essencial representar os componentes do sistema de forma apropriada para a faixa de frequência apresentada pelos transitórios de alta frequência. Uma fidelidade absoluta na representação dos diferentes componentes da subestação nesta situação é difícil. Algumas aproximações nas suas representações digitais deverão ser aceitas, como se verá adiante. O objetivo deste trabalho é descrever, de forma teórica, como se formam as sobretensões de frente muito rápida, mostrando como esta formação poderá ser reproduzida através de simulações digitais. O trabalho também apresenta detalhes da modelagem dos diferentes componentes internos das subestações isoladas a SF₆ (barramentos, invólucros dos barramentos, espaçadores, disjuntores, anéis de corona, transformadores de potencial indutivos e capacitivos, transformadores de corrente, buchas, chaves seccionadoras, pára-raios, etc.) e dos componentes externos (linhas de transmissão, transformadores de potência, condutores de ligação com a terra, etc.), para a realização de simulações digitais. Finalmente, serão apresentados exemplos de resultados obtidos através de simulações efetuadas com o programa EMTP/ATP para a subestação de Grajau 500 kV, cujos componentes foram modelados conforme descrito no trabalho.

2.0 - TRANSITÓRIOS DE ALTA FREQUÊNCIA GERADOS PELA OPERAÇÃO DE SECCIONADORAS

Os transitórios de frentes mais íngremes e de maiores frequências, do que aqueles que aparecem nas subestações convencionais, aparecem nas subestações isoladas a SF₆ como consequência das pequenas distâncias envolvidas, da rápida propagação dos surtos e do fato do SF₆ ser um gás eletronegativo. O elevado número de reacendimentos que acontecem através dos contatos das seccionadoras, conforme será mostrado a seguir, provocam o aparecimento de um grande número de transitórios de alta frequência durante cada operação de uma seccionadora. Por exemplo, na Subestação da Usina de Itaipu 60 Hz podem ocorrer até cerca de 80 reacendimentos por manobra (5). A seguir, para permitir um melhor entendimento de conceitos relativos a modelagem e simulações com o EMTP/ATP, será mostrado um resumo teórico sobre a formação das sobretensões transitórias de alta frequência (6).

2.1 Reacendimentos durante operação de seccionadoras

Ao se efetuar uma manobra de abertura de uma seccionadora, para desconectar um trecho de barramento, a partir do momento em que ocorre a separação elétrica dos contatos, o lado que fica em "vazio" mantém a tensão do sistema (U_2), que decairá lentamente (ver Figuras 1 e 2). Enquanto isso no lado ligado ao sistema, a tensão U_1 continua a variar conforme a frequência da fonte. Como a velocidade de separação dos contatos é pequena, a diferença de potencial $U_1 - U_2$ entre os mesmos acaba por superar a rigidez dielétrica do gás U_B provocando um reacendimento de arco. O SF₆ (absorvendo elétrons livres, pelo fato de ser um gás eletronegativo) tenta extinguir a corrente antes que a separação mecânica entre os contatos seja suficiente para uma completa interrupção. Isto ocorre sucessivas vezes até que a distância entre contatos seja suficientemente grande para que não ocorra mais reacendimentos (ver Figura 2).

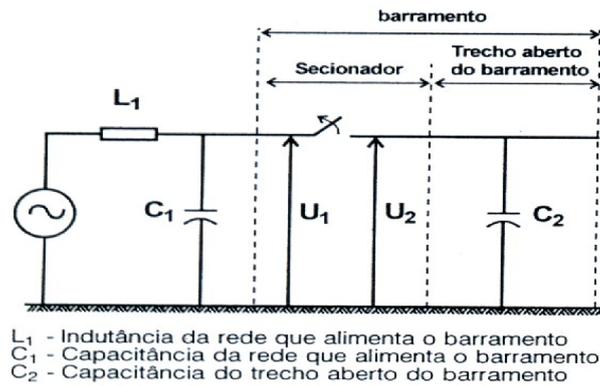


FIGURA 1 - Manobra de um trecho de barramento isolado a SF₆

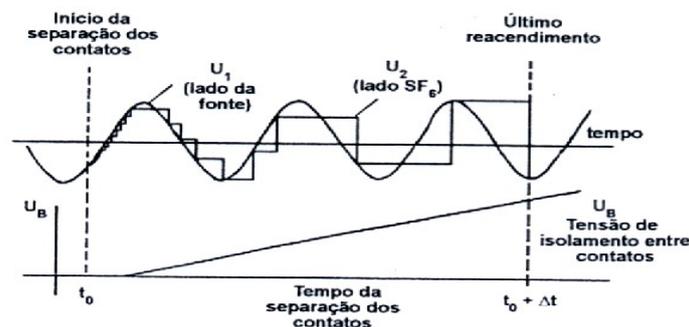


FIGURA 2 - Tensões nos terminais da secionadora e de isolamento entre seus contatos durante sua manobra

2.2 Carga armazenada

Após qualquer interrupção da corrente, durante uma manobra de secionadora, permanece no trecho de barramento "flutuante" (trecho manobrado), que funciona como se fosse um capacitor carregado (ver Figuras 1 e 2), uma tensão residual (carga armazenada) que decai lentamente. Este valor de tensão residual é fator determinante da amplitude máxima das sobretensões que se desenvolverão no interior da subestação. A carga armazenada deixada no trecho "flutuante" é uma característica advinda do projeto da secionadora. Então, quando ocorre cada um dos reacendimentos, nos terminais da secionadora tem-se: de um lado a tensão da fonte (U_1) e do outro a carga armazenada (U_2). Quanto maior for a carga armazenada, maiores serão as sobretensões.

2.3 Formação das sobretensões

As distâncias encontradas nas subestações isoladas a gás (GIS), entre os diferentes equipamentos, são pequenas, se comparadas com as distâncias que se tem nas subestações convencionais. As sobretensões encontradas resultam da superposição das reflexões que ocorrem em discontinuidades no interior das GIS (terminais abertos, seções "T", pontos com capacitâncias concentradas, encontro de trechos de barramentos com diferentes impedâncias de surto, bucha de ligação com condutores aéreos, etc.). A formação das sobretensões com pequenos tempos de frente de onda e altas frequências é, então, um fenômeno puramente de ondas trafegantes. Por isso, as sobretensões encontradas poderão variar de forma e amplitude em locais situados a poucos metros de distância um do outro.

3.0 - CONCEITOS BÁSICOS DE MODELAGEM

Do ponto de vista de modelagem em programas digitais, uma GIS pode ser vista como uma rede de linhas de transmissão coaxiais, de baixa perda, ou praticamente sem perdas. Quando esta rede é estimulada por ondas trafegantes de pequenas frentes de onda, como as geradas pela operação de chaves secionadoras, aparecem as sobretensões de alta frequência resultante de reflexões em pontos de discontinuidades e terminações. Devido aos pequenos tempos de frente de onda (5-15 ns) dos surtos que são gerados ao se manobrar as chaves secionadoras, conceitos de linhas de transmissão (parâmetros distribuídos) são largamente empregados na modelagem de componentes empregados nas GIS (6). Para se obter resultados precisos nas simulações digitais, são requeridos modelos detalhados. A obtenção destes modelos nem sempre é tarefa fácil, mesmo para fabricantes ou centros de pesquisa. Tem-se conhecimento de modelos utilizados em alguns trabalhos já

realizados (5) e (7), que são específicos para os equipamentos estudados e, por isso, nem sempre podem ser generalizados. Para o estudo de grandes subestações, onde muitos componentes são envolvidos, é necessário se aceitar modelos mais simples, de uso mais geral, onde certas simplificações deverão ser admitidas, como, por exemplo, a representação de alguns componentes por parâmetros concentrados. Isto pode ferir alguns princípios, mas preenche os requisitos necessários para a realização das simulações. Estes modelos simplificados que pela prática podem ser considerados apropriados são, em geral, conservativos, numa medida aceitável. A possibilidade do uso destes modelos simplificados foi, em alguns casos, confirmada através de medições de campo (6) e (7).

4.0 - MODELAGEM DOS COMPONENTES ENCONTRADOS NAS SUBESTAÇÕES ISOLADAS A SF₆

4.1 Barramentos isolados a SF₆

Os diferentes trechos de barramento devem ser representados como uma linha de transmissão sem perdas, através de sua impedância de surto e de seu comprimento. A velocidade de propagação dos surtos pode ser considerada igual à velocidade da luz. A impedância de surto do barramento isolado a SF₆ poderá ser calculada a partir de suas dimensões físicas, utilizando-se a expressão (1):

$$Z_b = 60 \ln \left(\frac{r_o}{r_c} \right) \text{ ohms} \quad (1)$$

Onde: r_o = raio interno do invólucro
 r_c = raio externo do condutor

Deverá ser feito um levantamento minucioso da geometria da subestação, obtendo-se as distâncias entre os diferentes componentes da GIS, definindo-se os pequenos trechos de barramento, de forma a permitir a sua representação no EMTP/ATP. Simultaneamente, calculam-se as impedâncias de surto de cada um dos trechos de barramento, como mostrado acima, caso sejam diferentes. Valores típicos destas impedâncias estão dentro da faixa de 40-80 ohms.

4.2 Invólucro dos barramentos isolados a SF₆

Se houver necessidade da representação do invólucro, isto poderá ser feito da mesma forma que se representa o barramento, sendo a sua impedância de surto calculada como a de um cilindro acima do plano de terra, utilizando-se a expressão (2), se o mesmo estiver numa posição horizontal. A velocidade de propagação dos surtos pode ser considerada igual à velocidade da luz, da mesma forma que nos barramentos.

$$Z_i = 60 \ln \frac{2h}{r_e} \text{ ohms} \quad (2)$$

Onde: h = altura do centro do cilindro para o solo
 r_e = raio externo do cilindro.

Normalmente não se representa o invólucro nas simulações que visam o cálculo das sobretensões internas ao barramento, o que leva a obtenção de valores conservativos (5), (6), (7) e (8). Sua consideração acrescenta um grau maior de dificuldade na simulação e muitas vezes não pode ser feita fielmente, como no caso em que se encontram trechos na posição vertical. Apenas nos casos em que se quer observar a elevação transitória de potencial para terra no próprio invólucro a sua representação deve ser feita (9), assim mesmo com as mesmas dificuldades apontadas anteriormente. Se o invólucro estiver numa posição vertical, sua impedância poderá ser calculada utilizando-se a expressão (3). Pode-se ver que é necessário adotar uma altura média para uma dada seção de cilindro considerada.

$$Z_i = 60 \ln \frac{2\sqrt{2} h}{r_e} \text{ ohms} \quad (3)$$

Onde: h = altura média da seção de cilindro vertical
 r_e = raio externo do cilindro.

4.3 Espaçadores

Os condutores principais são apoiados dentro do invólucro por espaçadores (isoladores), cuja presença causa um efeito capacitivo maior. Seu efeito poderia ser normalmente desprezado, devido à pequena capacitância a ser considerada. Entretanto, caso se queira evitar diferenças cumulativas nos cálculos, os espaçadores poderão ser considerados representados por uma capacitância de 20 pF no seu local de instalação.

4.4 Linhas de transmissão

As linhas de transmissão (ou os barramentos aéreos) que operam ligadas ao barramento isolado a SF₆ poderão ser representadas por sua impedância de surto. Considerando que os surtos gerados no interior da subestação ao atingirem as linhas não mais retornarão ao barramento, o comprimento a ser considerado na sua representação

deverá ser tal que o tempo de trânsito na linha representada (ida e volta) deverá ser maior que o tempo total das simulações. Para os barramentos aéreos deverão ser considerados seus comprimentos exatos.

4.5 Condutores de ligação com a terra

Conforme foi mencionado no item 4.2, a modelagem de condutores na posição vertical é difícil, pois sua impedância de surto varia de acordo com a altura em relação ao solo, sendo calculada utilizando-se a expressão (4), similar à expressão (3).

$$Z_c = 60 \ln \frac{2\sqrt{2} h}{r_c} \text{ ohms} \quad (4)$$

Onde: h = altura média do condutor na posição vertical
 r_c = raio externo do condutor

Pode-se representar estes componentes, de maneira aproximada, por uma impedância de surto média, de valor constante calculada como mostrado acima, ou, como é mais comum, por uma indutância concentrada de $1 \mu\text{H/m}$, levando-se em consideração seu comprimento exato.

4.6 Disjuntores

O disjuntor é um equipamento que tem um modelo de representação particular, dependendo de seu projeto. Um exemplo disto pode ser visto em (5), onde são apresentados modelos conseguidos do próprio fabricante do disjuntor que se queria representar (nas posições aberta e fechada). Se isto não for possível, o disjuntor poderá ser representado por seu comprimento e por sua impedância de surto Z_d , conforme mostrado em (10) que pode ser estimada através da expressão (5):

$$Z_d = \frac{\ell_c}{C_c \cdot v} \text{ ohms} \quad (5)$$

Onde: ℓ_c = comprimento do disjuntor em mm
 C_c = capacitância interna do disjuntor, em pF
 v = velocidade de trânsito do surto ($300 \text{ m}/\mu\text{s}$)

Caso a obtenção de dados seja difícil, uma outra alternativa que pode ser adotada é a representação do disjuntor na posição fechada como uma extensão do barramento, levando-se em conta o seu comprimento. Na posição aberta, deve-se dividir o comprimento do disjuntor em duas partes iguais, adicionando-se entre elas uma capacitância série (representativa dos capacitores de equalização, se estes componentes existirem).

4.7 Anéis de corona

Os anéis de corona que são encontrados no interior do barramento isolado a SF_6 podem ser representados da mesma forma que os espaçadores, isto é, pela consideração de pequenas capacitâncias de 20 pF , concentradas no ponto exato de sua localização.

4.8 Transformadores de potencial capacitivos

Estes equipamentos podem ser representados por uma capacitância concentrada, relativa à coluna de capacitores do divisor capacitivo, geralmente da ordem de 1500 a 5000 pF . Sua consideração tem efeito importante na propagação dos surtos.

4.9 Transformadores de potencial indutivos

Os transformadores de potencial indutivos podem também ser representados por capacitâncias concentradas. Um valor típico considerado apropriado para sua representação é da ordem de 100 pF .

4.10 Transformadores de corrente

Os transformadores de corrente localizam-se concêntricos ao condutor principal e ao invólucro. Devido ao seu pequeno comprimento, sua influência pode ser desprezada. Assim não é necessário se dar especial atenção à representação destes equipamentos que pode ser considerado como uma extensão do barramento.

4.11 Chaves seccionadoras

As chaves seccionadoras poderão ser representadas, na posição fechada, como uma extensão do barramento. Na posição aberta a representação deverá ser um "circuito aberto" e o comprimento da seccionadora adicionado, da mesma forma, ao barramento como se fosse sua continuação. Modelos mais específicos poderão ser utilizados se obtidos junto a seus fabricantes (5). Dinamicamente, no caso da geração de transitórios (isto é, a seccionadora que

está sendo manobrada), elas podem ser modeladas, artificialmente, por duas fontes de impulsos de corrente, com polaridades opostas, localizadas em pontos que correspondem aos terminais, com uma pequena resistência unindo as duas fontes. Esta representação pode ser empregada porque os reacendimentos que ocorrem entre os terminais da seccionadora manobrada funcionam como geradores de impulsos. Uma outra alternativa pode ser a representação através do modelo de chave ordinária, disponível no EMTP/ATP. A primeira forma de representação é mais apropriada porque permite que os impulsos gerados tenham a forma de rampa, com tempos de subida da ordem de 5-15 ns (6).

4.12 Terminação Ar/SF₆

Normalmente, nos estudos em que se quer determinar as tensões impostas aos equipamentos e aos barramentos, não se modela o invólucro. Esta modelagem só é feita apenas no caso em que se procura observar a elevação transitória de potencial para terra. Os transitórios que trafegam na parte interna do invólucro não aparecerão na sua parte externa, como elevação transitória de potencial para terra, a menos que seja encontrada uma “descontinuidade”. Na maioria dos projetos, esta descontinuidade é encontrada nas terminações Ar/SF₆. Este ponto constitui-se na junção de três linhas de transmissão, cada uma delas tendo impedâncias de surto próprias, a saber: a) condutor interno; b) linha de transmissão aérea, externa ao barramento isolado a SF₆; c) invólucro do barramento. Para se representar uma terminação Ar/SF₆ é necessário recorrer-se a um artifício de modelagem (ver Figura 3). Um transformador ideal (aproximado por um transformador com baixas reatâncias de dispersão) é utilizado para se efetuar a ligação entre as diferentes linhas de transmissão. Fisicamente este transformador não existe. Esta forma de modelagem foi proposta a partir de pesquisa realizada na Ontario Hydro, co-patrocinada pelo CEPEL e por FURNAS – Centrais Elétricas S.A. (9).

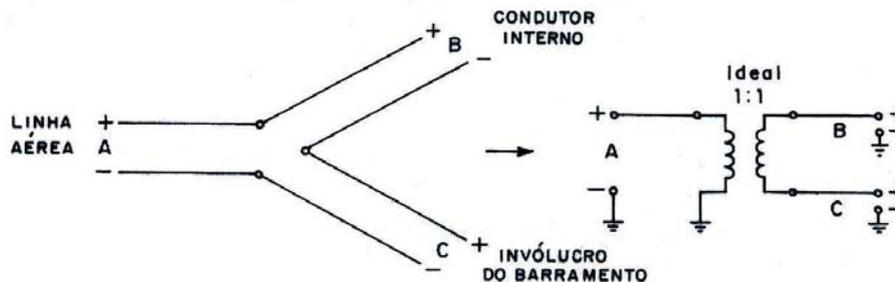


FIGURA 3 – Artifício para simulação digital da terminação Ar/SF₆ (9)

4.13 Buchas

As ligações da GIS com as linhas aéreas são feitas através de buchas construídas para esta finalidade. Dois diferentes projetos de buchas podem ser encontrados: isoladas a gás e condensivas. A sua representação através de um modelo detalhado só poderá ser feita com a participação do seu fabricante. As buchas mudam gradualmente o valor da impedância de surto da linha aérea para o valor da impedância da GIS. No estudo apresentado em (5), as buchas foram divididas em duas seções de linhas de transmissão em série. Uma seção ligada ao barramento isolado a SF₆, com a impedância de surto deste barramento e comprimento de 2,58 m (2/4,5 do comprimento total da bucha). A outra seção, em série com a identificada acima, tendo a impedância de surto da linha de transmissão e comprimento de 3,22 m (2,5/4,5 do comprimento total da bucha). Em algumas situações, pela falta de um modelo mais apropriado, uma capacitância concentrada no local da instalação da bucha é adotada para representá-la. Neste caso, deve-se somar seu comprimento ao do barramento.

4.14 Pára-raios

Se os surtos atingirem valores elevados no local de instalação dos pára-raios, estes equipamentos poderão ser representados por uma resistência não linear, com curva *tensão versus corrente* relativa ao seu desempenho para frente de onda (ou mais elevada se disponível por parte de seu fabricante), se forem do tipo de óxido de zinco. Deve-se levar em consideração a existência dos “leads” de ligação dos pára-raios com a fase e com a terra. Se os pára-raios forem do tipo convencional o modelo deverá levar em consideração a existência do “gap”. Se os surtos não atingirem valores elevados no local de instalação dos pára-raios, pode-se representá-los por meio de uma capacitância concentrada na faixa de 100-200 pF.

4.15 Transformadores de potência

A altas frequências, um transformador de potência comporta-se como uma complexa rede capacitiva, consistindo de capacitâncias série, entre espiras e bobinas, e paralelo (em relação ao núcleo e o tanque que são aterrados), além de indutâncias (próprias e mútuas) e resistências (8). Se houver uma participação do fabricante destes

equipamentos, poderá ser adotado nas simulações um modelo detalhado, similar ao mostrado na Figura 4 (11), de modo que se leve em conta a resposta para altas freqüências do transformador, de acordo com seu projeto. Esta modelagem detalhada foi adotada em estudo realizado para a subestação de Tucuruí 500 kV, da Eletronorte (8).

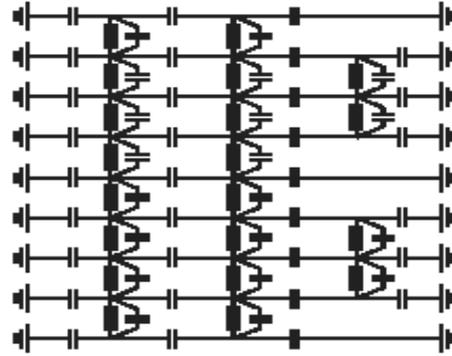


FIGURA 4 – Modelo (teórico) de representação de um transformador para altas freqüências (11)

Se a transferência de surtos, através do transformador, não precisar ser analisada, uma alternativa ao modelo detalhado referido acima, é a obtenção de um circuito equivalente que reproduza a resposta em freqüência do transformador de potência, vista dos seus terminais, utilizando-se, por exemplo, um programa de síntese de redes para modelagem de equivalentes em freqüência, como o programa SINTNET, desenvolvido no CEPEL (12). Esta alternativa poderá ser adotada desde que seja feito um levantamento da resposta em freqüência do transformador de potência, através de medições de campo, trabalho também realizado pelo CEPEL. Neste caso, as sobretensões serão observadas exteriormente à bucha do transformador (na GIS e demais equipamentos).

5.0 - EXEMPLO DE SIMULAÇÃO DIGITAL

Para exemplificar a realização de simulações com o EMTP/ATP, apresentam-se (ver Figuras 5 a 7) resultados de investigações realizadas para a subestação de Grajaú 500 kV, de FURNAS-Centrals Elétricas S.A. (13). Não foram encontradas sobretensões elevadas. Suas amplitudes foram sempre inferiores aos níveis de isolamento dos equipamentos, apresentando valores máximos de 2,0 p.u..

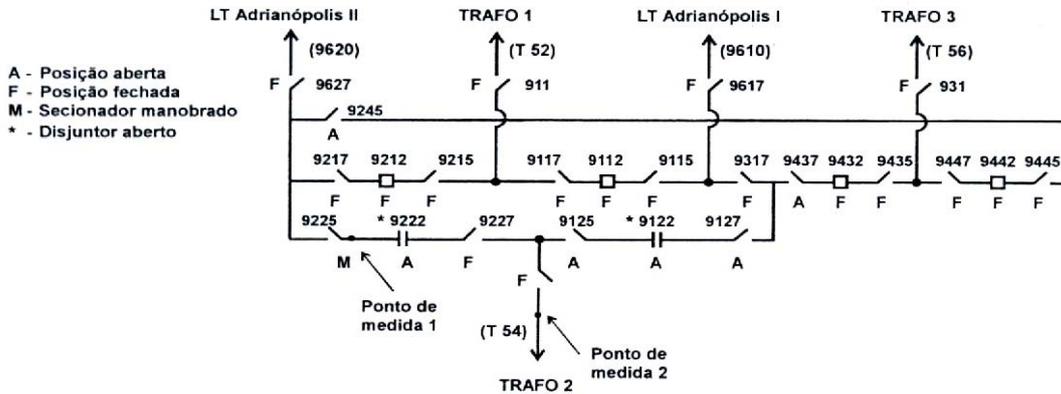


FIGURA 5 – Configuração da subestação de Grajaú simulada no EMTP/ATP

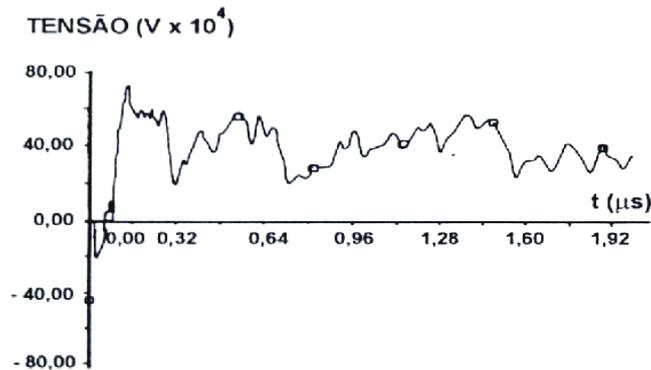


FIGURA 6 – Tensão no ponto de medida 1 (configuração da Figura 5)

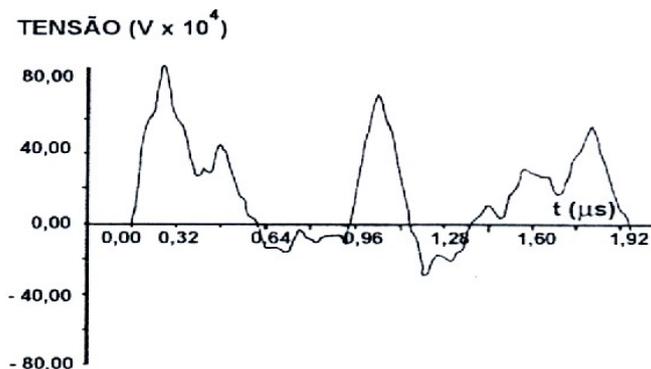


FIGURA 7 – Tensão no ponto de medida 2 (configuração da Figura 5)

6.0 - CONCLUSÃO

As sobretensões transitórias de alta frequência geradas pela operação de seccionadoras no interior de GIS poderão ser determinadas através de simulações digitais com o EMTP/ATP.

A resposta dos diferentes equipamentos aos surtos de pequenos tempos de frente de onda gerados pela operação das chaves seccionadoras é bastante particular. A sua representação fiel exige a determinação individual de seus modelos, o que é praticamente impossível em alguns casos. Em parte, isto foi feito em trabalhos de pesquisa realizados no exterior (6) e (7). Estes trabalhos são demorados e custosos. Alternativamente, pode-se combinar a utilização de modelos detalhados de alguns componentes com modelos mais simplificados, conforme descrito no item 4.0.

No caso de subestações E.A.T., considerando a possibilidade de que equipamentos importantes como os transformadores possam vir a falhar, é recomendável que se inclua na concorrência de compra da GIS: a solicitação da realização de estudos para determinação das sobretensões de alta frequência, a análise de sua ação sobre o isolamento dos equipamentos e o fornecimento dos modelos utilizados nos referidos estudos.

7.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) NBR 6949 - "Coordenação do Isolamento – Procedimento", ABNT, 2000
- (2) CIGRE WG 33.02 - "Guidelines for representation of network elements when calculating transients", 1990
- (3) IEC 60071-1 - "Insulation Coordination – Part 1: Definition, Principles and Rules", 1993
- (4) IEC 60071-2 - "Insulation Coordination – Part 2: Application Guide", 1996
- (5) SILVEIRA, J. R., SALGADO CARVALHO, F. M. et al. - "Avaliação dos surtos de manobra produzidos por seccionadoras, no setor de 60 Hz da GIS de Itaipu, usando-se o programa EMTP", IX SNPTEE, 1987
- (6) BOGGS, S. A. et al. - "Disconnect switch induced transients and trapped charge in gas-insulated substations", IEEE Winter Meeting, New York, February 1982
- (7) GRANDL, J. et al. - "Studies of very fast transients in a 765 kV substation", paper 33.12, CIGRE 1988
- (8) ROHRBACH, P., LACORTE, M., MENDES, J. C. e MACHADO Jr., C. - "Subestação elevadora 550 kV isolada a gás SF₆ – simulações de VFT como suporte no projeto de transformador", XVI SNPTEE, Campinas, 2001
- (9) FUJIMOTO, N. et al. - "Transient grounding potential rise in gas-insulated substations-experimental studies" IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, vol. PAS-104, nº 5, May 1985
- (10) BOECK, W. et al. - "Fundamental and specific data of metal-enclosed substations for the insulation coordination", paper 21.03, CIGRE 1978
- (11) Summary paper of the CIGRE JWG 12/13/23.21 - "Electrical environment of transformers-impact of fast transients", CIGRE 2002
- (12) AZEVEDO, R. M. e JUNQUEIRA, A. J. S. - "Programa SINTNET - Síntese de redes para modelagem de equivalentes em frequência - método de Caer", Relatório CEPEL 851/95 - DPP/TEC, 1995
- (13) ESMERALDO, P. C. V. e SALGADO CARVALHO, F. M. - "Surge propagation analysis: an application to the Grajau 500 kV SF₆ gas-insulated substation", paper 33.01, CIGRE 1988