



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

GSC - 29
16 a 21 Outubro de 2005
Curitiba - Paraná

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

**ESTUDO DE TENSÕES TRANSITÓRIAS DE ALTA FREQUÊNCIA E REQUISITOS
PARA A ESPECIFICAÇÃO DE TRANSFORMADORES**

Antonio Roseval F. Freire (*) Miguel Carlos Medina Pena

COMPANHIA HIDRO ELÉTRICA DO SÃO FRANCISCO (CHESF)

RESUMO

Neste trabalho apresenta-se um caso prático de falha de um transformador por ressonância interna dos enrolamentos, durante manobras de energização em vazio, decorrente de uma interação transitória do transformador com o sistema, numa subestação de 230kV com arranjo em barra principal e auxiliar. Esta ocorrência motivou o desenvolvimento de um estudo das tensões transitórias de alta frequência para uma subestação de 230kV com um arranjo físico em barra dupla a quatro chaves. No estudo foram calculados as formas de onda e os espectros de frequências das tensões transitórias, para as manobras de energização de transformadores em vazio e curtos-circuitos em linhas de transmissão de 230kV, em várias configurações de operação. Com base na análise dos resultados obtidos, apresenta-se também uma proposta de metodologia para a definição de requisitos do sistema para as especificações técnicas de transformadores.

PALAVRAS-CHAVE

Tensões Transitórias, Energização de Transformadores, Curtos-Circuitos em Linhas, Ressonância Interna de Enrolamentos, Especificação de Transformadores.

1.0 - INTRODUÇÃO

Numa instalação típica de um sistema de potência, os transformadores são submetidos a uma grande variedade de fenômenos transitórios, originados por curtos-circuitos, descargas atmosféricas, manobras, etc. Nas subestações convencionais isoladas a ar, as tensões transitórias de alta frequência, originadas por esses distúrbios, têm componentes importantes na faixa de frequência típica de 1kHz a 1MHz.

Por outro lado, todo transformador possui uma característica de impedância dependente da frequência, de tal forma que a relação entre as tensões internas nos enrolamentos do transformador e a tensão transitória aplicada entre um terminal e a terra, ou entre seus terminais, é dependente do espectro de frequências da forma de onda da tensão aplicada e das características físicas e construtivas intrínsecas do projeto do transformador. Cada espira dos enrolamentos tem indutâncias próprias, associadas ao fluxo da corrente na espira, indutâncias mútuas com bobinas vizinhas, capacitâncias para a terra (núcleo, tanque), acoplamentos capacitivos com outros enrolamentos e com bobinas do mesmo enrolamento e resistências associadas às perdas nos enrolamentos, no isolamento e no núcleo. Esta rede complexa de circuitos RLC, forma vários circuitos ressonantes.

Quando no espectro de frequências da tensão transitória gerada por distúrbios no sistema, existe uma ou mais componentes de tensão importantes em frequências que coincidem com frequências de ressonância dos enrolamentos do transformador, podem ocorrer elevadas tensões internas ou nos terminais externos, dependendo

**(*) Rua Delmiro Gouveia, 333 – Sala A314 - CEP 50761-901 - Recife - PE - Brasil
Tel.: (081) 3229-4048 - Fax: (081) 3229-4058 - e-mail: roseval@chesf.gov.br**

do fator de amplificação no ponto de ressonância e da amplitude da componente de tensão nesta frequência. Nesta condição de ressonância, o isolamento interno do transformador pode ser fortemente solicitado mesmo que a magnitude da tensão transitória nos seus terminais seja limitada ou esteja abaixo do nível de atuação de pára-raios. Os riscos de descargas internas e ou danificação, dependem da suportabilidade da estrutura interna do isolamento.

Atualmente este tipo de interação transitória entre o transformador e o sistema é uma das principais causas de curtos-circuitos internos e em buchas de transformadores, e até de danificação, como indica a relativamente grande quantidade de casos já diagnosticados (1), (2). Algumas ocorrências no sistema de transmissão da Chesf, originadas por curtos-circuitos em linhas de transmissão ou manobras de transformadores, ratificam esta constatação (3). As condições que causam este tipo de falha têm despertado grande interesse nas empresas de energia elétrica uma vez que os transformadores que apresentaram defeito foram devidamente aprovados nos testes de laboratório previstos em Normas Técnicas.

Numa perturbação recente, durante manobras de energização em vazio de um transformador de 230/138/13,8kV – 55MVA, ocorreram curtos-circuitos para a terra nas buchas dos terminais de 13,8kV, com desligamento automático do transformador pela atuação rápida da sua proteção diferencial. As análises técnicas desta perturbação indicaram que o conhecimento prévio das formas de onda e do espectro de frequências das tensões transitórias, e da resposta em frequência dos transformadores, permite determinar antecipadamente medidas apropriadas para prevenir falhas.

Através da especificação técnica dos transformadores é possível atuar preventivamente no sentido de evitar ou de minimizar os riscos de falhas associadas à interação transitória do transformador com o sistema. Com o objetivo de subsidiar a elaboração de uma proposta de metodologia para definir os requisitos de sistema para a especificação técnica dos transformadores, foram desenvolvidos estudos para avaliar as faixas de frequência típicas e as respectivas componentes de tensão do padrão de subestação de 230kV especificado nos Procedimentos de Rede (4).

2.0 - EXPERIÊNCIA PRÁTICA COM RESSONÂNCIA INTERNA DOS ENROLAMENTOS

O setor de 230kV da subestação Campina Grande II apresenta um arranjo físico em barra principal e auxiliar, conforme o padrão utilizado em várias subestações da Chesf, com um total de dezenove eventos, sendo dez linhas de transmissão e seis transformadores. O transformador 04T2 230/138/13,8kV – 55MVA é protegido por pára-raios nos terminais de 230kV e 138kV, e operava com os terminais de 13,8kV isolados e sem pára-raios. Com o disjuntor de 230kV próprio do transformador (14T2) liberado para manutenção, foram realizadas três tentativas de energização em vazio através do disjuntor de transferência da subestação (14D1), ocorrendo curto-circuito nos terminais de 13,8kV, seguido do rápido desligamento automático do transformador pela atuação da sua proteção diferencial. Em manobras anteriores através do disjuntor 14T2 não se observou qualquer anormalidade.

Uma análise preliminar das ocorrências indicou a possibilidade de sobretensões transitórias nos terminais de 13,8kV, originadas por ressonância interna dos enrolamentos. Considerando que os resultados dos testes de rotina realizados no transformador indicaram que o equipamento encontrava-se em perfeito estado, afastando suspeitas de defeitos internos, e o histórico das manobras através do disjuntor 14T2, foi decidido instalar pára-raios de óxido de zinco (ZnO) com tensão nominal de 18kV nos terminais de 13,8kV e o transformador retornou à operação normal através do disjuntor 14T2, quando o trabalho de manutenção no disjuntor foi concluído.

Atendendo as recomendações das análises preliminares das ocorrências, foram iniciados os estudos de transitórios eletromagnéticos para calcular as tensões transitórias de alta frequência nos terminais de 230kV do transformador e para avaliar as possíveis soluções para o problema. Ao mesmo tempo o Centro de Pesquisas de Energia Elétrica (CEPEL) foi contratado para realizar ensaios de resposta em frequência no campo, com medição das impedâncias vistas dos terminais e dos fatores de amplificação do transformador 04T2, em função da frequência.

Na Figura 1 são apresentados os resultados da medição de resposta em frequência, incluindo a impedância entre um terminal de 230kV e a terra, e o maior fator de amplificação medido nos terminais de 13,8kV, para um sinal aplicado nos terminais de 230kV, com os demais terminais isolados. O fator de amplificação atinge um valor máximo de 257pu numa frequência de 158kHz. Os valores medidos de módulo e ângulo da impedância foram utilizados para calcular um circuito equivalente do transformador, visto dos terminais de 230kV, capaz de reproduzir, pelo menos aproximadamente, a curva medida de impedância em função da frequência. Este modelo, do tipo $Z(\omega)$, foi utilizado nos estudos de transitórios eletromagnéticos.

A Figura 2 apresenta a forma de onda e o espectro de freqüências da tensão transitória fase-terra calculada nos terminais de 230kV do transformador 04T2, para a manobra de energização em vazio. A sobretensão máxima atinge 1,75pu e 1,95pu para a manobra com os disjuntores 14T2 e 14D1, respectivamente. Nos dois casos os valores máximos calculados estão abaixo do nível de atuação dos pára-raios de 230kV. As componentes de tensão mais elevadas ocorrem nas freqüências de 350kHz e 210kHz, atingindo os valores de 21,5kV e 29,8kV, respectivamente. Na faixa de 150kHz a 250kHz, as componentes de tensão são significativamente mais elevadas na manobra com o disjuntor 14D1.

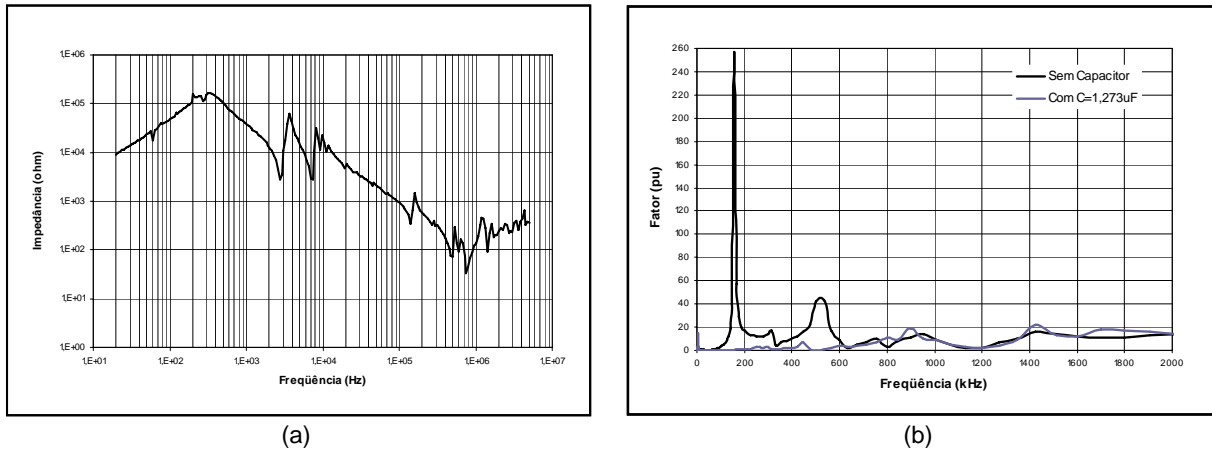


FIGURA 1 – Impedância $Z(\omega)$ e fator de amplificação medidos.

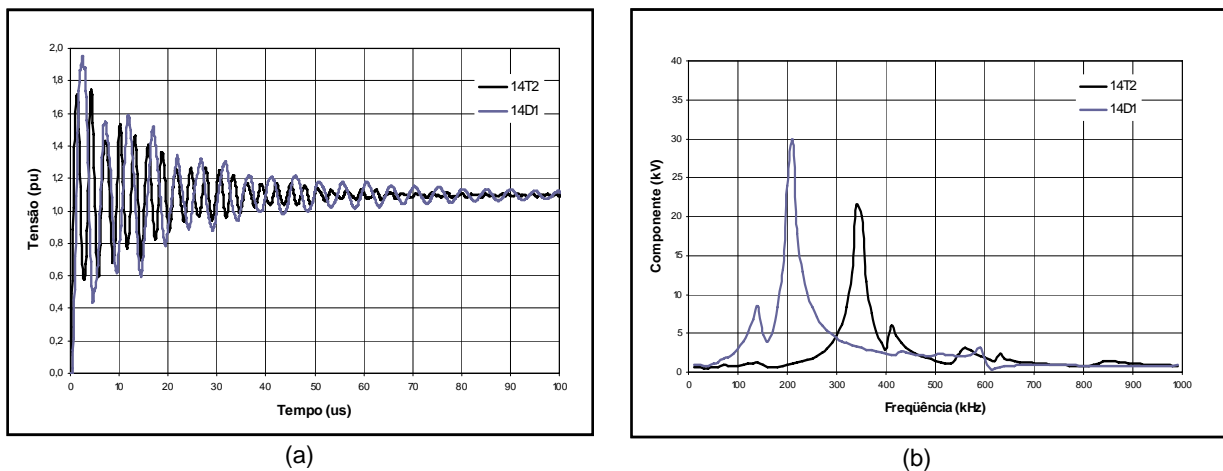


FIGURA 2 – Tensão transitória calculada nos terminais de 230kV.

Conhecendo o espectro de freqüências da tensão transitória nos terminais de 230kV e os fatores de amplificação medidos para cada freqüência, é possível calcular as componentes de tensão fase-terra nos terminais de 13,8kV. A Figura 3 mostra as componentes de tensão calculadas para as manobras com os disjuntores 14T2 e 14D1. Este resultado mostra que a manobra com o disjuntor 14D1 pode gerar sobretensões transitórias elevadas nos terminais de 13,8kV, justificando a ocorrência de curtos-circuitos durante as manobras.

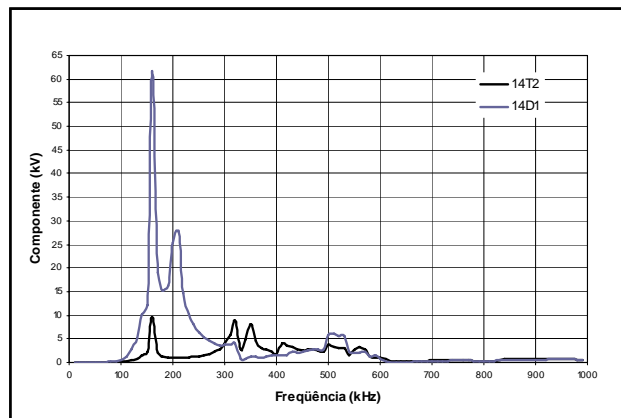


FIGURA 3 – Componentes de tensão calculadas nos terminais de 13,8kV.

Os estudos de transitórios eletromagnéticos realizados também indicaram riscos de sobretensões transitórias elevadas nos terminais de 13,8kV, originadas por curtos-circuitos monofásicos em linhas de transmissão de 230kV derivadas da subestação Campina Grande II. Para evitar as sobretensões elevadas e possíveis efeitos de sobretensões internas devidas à ressonância dos enrolamentos, as análises indicaram como solução a instalação de capacitores de $1,273\mu\text{F}$ nos terminais de 13,8kV, protegidos por fusíveis extra rápido, em conjunto com os pára-raios de 18kV. Este tipo de solução já foi adotado com sucesso (1), mas deve ser aplicado com cautela em função dos efeitos de alteração da resposta em frequência do transformador, podendo aumentar o fator de amplificação em algumas frequências. A Figura 1-(b) mostra o efeito dos capacitores no fator de amplificação medido nos terminais de 13,8kV.

3.0 - SIMULAÇÕES DE TRANSITÓRIOS ELETROMAGNÉTICOS COM O ATP/EMTP

A Figura 4 apresenta o diagrama unifilar de uma subestação de 230kV, do tipo convencional e isolada a ar, que atende ao padrão de arranjo definido nos Procedimentos de Rede (4), com barra dupla empregando disjuntor simples com quatro chaves seccionadoras por célula de entrada de linha e transformador. A célula de interligação de barras tem um disjuntor simples e duas chaves seccionadoras. Os barramentos principais (B1 e B2) são constituídos de dois cabos CAA 954MCM por fase e os barramentos de interligação de barra, de equipamentos e de conexões com circuitos externos, são constituídos de apenas um cabo por fase. Mesmo com uma das barras predefinida para operar como barra de transferência, este arranjo físico apresenta diferenças importantes com relação ao padrão do setor de 230kV utilizado em várias subestações da Chesf, com barra principal e auxiliar, tais como a presença de transformadores de potencial capacitivo (TPC) nas células dos transformadores e o arranjo a quatro chaves.

Na primeira etapa indicada na Figura 4, estão previstas três linhas de transmissão de 230kV (V2, N2 e N1) e dois transformadores de 230/138kV – 55MVA (T1 e T2). Na segunda etapa prevista, os barramentos serão ampliados e serão adicionados os circuitos C1, C2 e C3 e os transformadores T3 e T4, totalizando seis linhas de transmissão e quatro transformadores. As linhas de transmissão em 230kV derivadas desta subestação apresentam comprimentos acima de 10km.

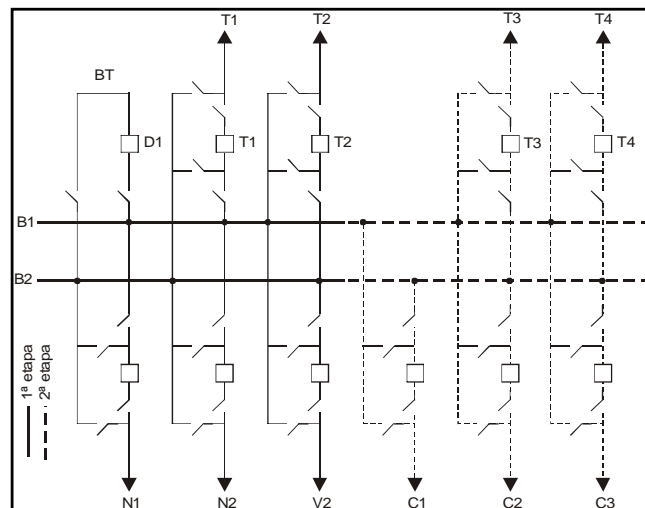


FIGURA 4 – Diagrama unifilar da SE em barra dupla a quatro chaves.

Para avaliar o desempenho do novo padrão de arranjo físico, foi realizado um estudo de transitórios eletromagnéticos para calcular as tensões transitórias de alta frequência, fase-terra, nos terminais dos transformadores e os correspondentes espectros de frequências, utilizando a transformada de Fourier. Em todos os casos simulados, considerou-se o instante mais severo para o fechamento do primeiro pólo do disjuntor ou aplicação do defeito, que corresponde ao instante de tensão máxima na respectiva fase, com tensão máxima operativa (1,10pu) na barra B1.

Os eventos simulados foram a energização de transformadores em vazio com o disjuntor próprio do transformador e com o disjuntor de transferência da subestação (D1), e curtos-circuitos monofásicos em linhas de transmissão

de 230kV. Foram consideradas várias configurações na primeira e segunda etapa da subestação, em condições normais de operação e em recomposição.

De um modo geral, no estudo realizado foram adotados os modelos e aproximações sugeridos nas referências (5), (6) e (7). O sistema de transmissão foi representado de forma simplificada, mas incluindo todas as linhas de transmissão em 230kV derivadas da subestação. Cada linha de transmissão foi representada com os parâmetros distribuídos de seqüência positiva e zero, utilizando o modelo de linha transposta do ATP, com um comprimento de 1km. No terminal remoto das linhas foram conectadas fontes de tensão com uma impedância de valor correspondente às impedâncias de surto de seqüência positiva e zero da linha. Com esta representação são eliminadas as reflexões de onda nos terminais remotos.

O setor de 230kV da subestação foi representado detalhadamente utilizando as informações do arranjo físico, planta e cortes, de acordo com o projeto. Os vários trechos de barramento foram representados por linhas de transmissão trifásicas e transpostas, utilizando o modelo padrão do ATP com parâmetros distribuídos calculados para uma freqüência de 100kHz, de forma a representar algum efeito do amortecimento proporcionado pela variação dos parâmetros com a freqüência. Os TPC de 230kV foram representados como um circuito RLC série, com uma capacitância equivalente representando o divisor capacitivo, uma indutância proporcional ao comprimento dos cabos de conexão, e uma resistência correspondente às perdas nos capacitores, em alta freqüência. Nos TPC utilizados em sistemas de "carrier", é importante incluir a indutância da bobina de drenagem.

Nas fases de planejamento e projeto de uma subestação, as características de resposta em freqüência dos transformadores, que dependem do projeto do equipamento, ainda são desconhecidas. Portanto, como uma primeira aproximação, nesta fase o transformador pode ser representado por um circuito RC paralelo, utilizando um valor típico de capacitância, representando a capacitância efetiva total de um terminal para a terra.

4.0 - ANÁLISE DOS RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES

4.1 Energização de Transformadores em Vazio

No instante do fechamento elétrico do primeiro pólo do disjuntor, são originadas ondas viajantes na subestação que sofrem reflexões e atenuações, gerando uma tensão transitória de alta freqüência nos terminais do transformador. A Figura 5 apresenta a forma de onda da tensão transitória calculada no terminal de 230kV do transformador T2, e o correspondente espectro de freqüências, na sua energização em vazio com os disjuntores T2 e D1, na condição de operação normal da primeira etapa. Nos dois casos os valores máximos de tensão estão abaixo do nível de atuação dos pára-raios de 230kV.

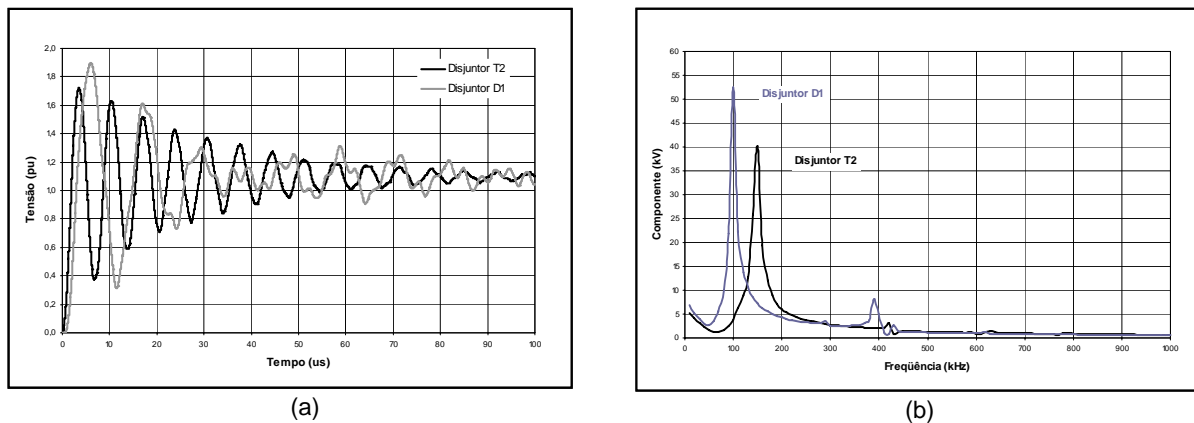


FIGURA 5 – Energização do transformador T2, em operação normal na primeira etapa.

Na manobra com o disjuntor D1 ocorre uma redução da freqüência dominante da tensão transitória, de 150kHz para 100kHz, que está associada ao aumento do comprimento elétrico dos trechos de barramento entre o disjuntor e o transformador T2. As componentes de tensão mais elevadas ocorrem próximo de 150kHz e 100kHz, atingindo os valores de 40,3kV e 52,5kV, respectivamente.

A Figura 6 mostra todos os espectros de freqüências calculados para as manobras de energização em vazio de transformadores, em condições de operação normal e em recomposição, na primeira e segunda etapa da subestação. As componentes de tensão mais elevadas ocorrem na faixa de 80kHz a 160kHz, dependendo da configuração, do transformador e do disjuntor utilizado na manobra. Na manobra com o disjuntor de transferência,

a frequência dominante é reduzida de 30kHz a 60kHz com relação à manobra pelo disjuntor do transformador, dependendo da configuração da subestação. Neste padrão de arranjo físico, quanto maior o número de linhas de transmissão ou transformadores em operação no instante da manobra, menor a frequência dominante.

Comparando-se as Figuras 2 e 5, pode ser observada a influência do padrão de arranjo físico da subestação no espectro de frequências das tensões transitórias nos terminais dos transformadores. No padrão de barra dupla a quatro chaves, as frequências dominantes são mais baixas e as componentes de tensão máximas são mais elevadas. Entretanto, a definição do arranjo mais crítico quanto à interação do transformador com o sistema depende da resposta em frequência e, por consequência, das características de projeto intrínsecas do transformador. A presença dos TPC nas células dos transformadores provoca um deslocamento do espectro de frequências no sentido das frequências mais baixas e uma elevação das componentes de tensão nesta faixa de frequências.

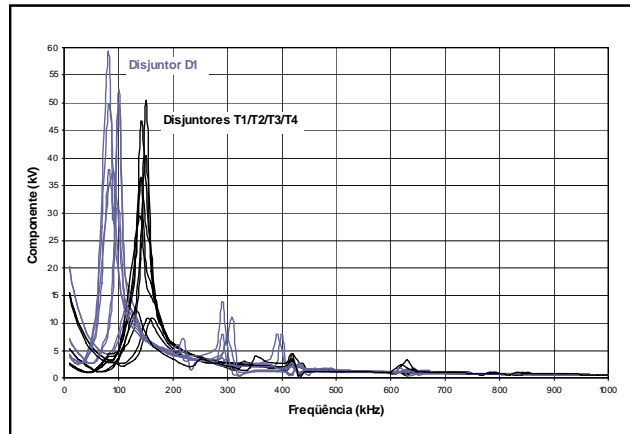
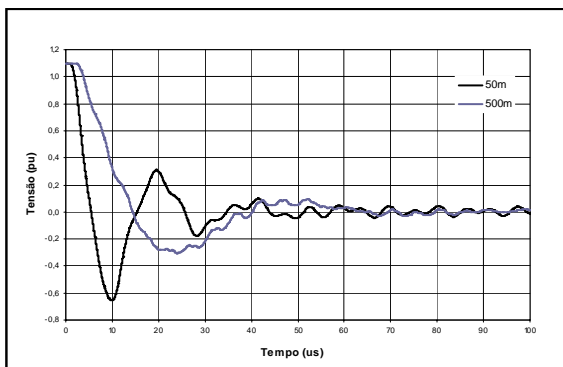


FIGURA 6 – Espectro de frequências para a energização de transformadores.

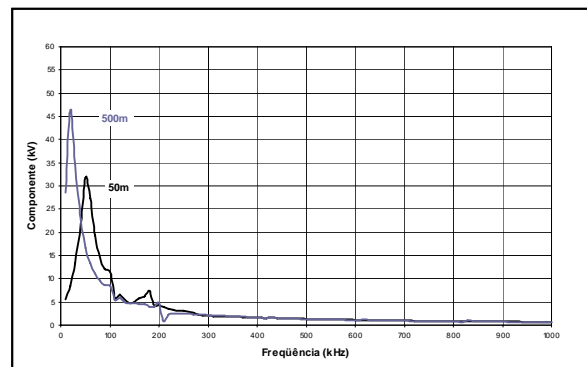
4.2 Curtos-Circuitos em Linhas de Transmissão de 230kV

A maior parte dos casos diagnosticados de falhas de transformadores por ressonância interna dos enrolamentos é coincidente com curtos-circuitos em linhas de transmissão. Levando em conta este fato, foram realizadas simulações de curtos-circuitos monofásicos em linhas de 230kV para calcular as tensões transitórias nos terminais de 230kV dos transformadores e o respectivo espectro de frequências. A aplicação do curto-circuito provoca uma variação rápida da tensão no ponto do defeito, originando ondas viajantes que sofrem reflexões e atenuações dentro da subestação, gerando tensões transitórias nos terminais dos transformadores.

A Figura 7 apresenta as formas de onda e o espectro de frequências da tensão transitória nos terminais do transformador T1 para curtos-circuitos na linha V2, a 50m e 500m da subestação, na configuração de operação normal da primeira etapa. As componentes de tensão mais elevadas ocorrem nas frequências de 50kHz e 20kHz, com valores máximos de 32,0kV e 46,5kV, respectivamente. Dependendo das características do transformador, os curtos-circuitos mais distantes da subestação podem ser mais severos em termos de ressonância interna dos enrolamentos. A frente de onda da tensão transitória que chega aos terminais dos transformadores é bastante amortecida pela propagação nos cabos e pelas capacitâncias. Este efeito de amortecimento reduz as componentes de frequências mais elevadas, na faixa de 500kHz a 1MHz.



(a)



(b)

FIGURA 7 – Curto-circuito na linha de transmissão V2, na configuração de operação normal da primeira etapa.

Nas simulações de curtos-circuitos monofásicos em linhas de transmissão de 230kV, também foram calculados os vários espectros de freqüências das tensões transitórias nos terminais dos transformadores, para as distâncias de 50m e 500m, em condições de operação normal e em recomposição, para a primeira e segunda etapa da subestação. Neste padrão de arranjo físico, as freqüências dominantes variam de 10kHz a 60kHz, dependendo da configuração, distância do curto-circuito e da linha de transmissão em que ocorre o curto-circuito. Quanto maior o número de linhas de transmissão e transformadores em operação na subestação, menor a freqüência dominante e menor a componente máxima de tensão. De um modo geral, o transformador submetido às maiores componentes de tensão é o mais distante do curto-circuito em termos de distância elétrica dos trechos de barramento.

5.0 - PROPOSTA DE METODOLOGIA PARA A DEFINIÇÃO DE REQUISITOS DO SISTEMA

Os resultados do estudo realizado indicam que é possível calcular os vários espectros de freqüências das tensões transitórias esperadas nos terminais dos transformadores, para um dado padrão de arranjo físico das subestações, levando em conta as diversas fases de expansão ou evolução do sistema de transmissão. As características das tensões transitórias nos terminais do transformador são um importante insumo para o seu projeto, especialmente para o dimensionamento da estrutura do isolamento interno (8).

Para determinar as tensões transitórias de alta freqüência nos terminais dos transformadores, e os respectivos espectros de freqüências, podem ser realizados estudos de transitórios eletromagnéticos com simulação de casos de energização de transformadores em vazio e curtos-circuitos em linhas de transmissão. Além desses eventos, também devem ser simulados casos de injeção de surtos atmosféricos e manobras de chaves seccionadoras com tensão, considerando reacendimentos do arco.

Com os resultados das simulações, os valores máximos das componentes de tensão para cada freqüência são selecionados para compor o espectro de freqüências da instalação. A Figura 8 mostra o espectro de freqüências com as componentes de tensão máximas calculadas nos terminais de 230kV, para a subestação com arranjo em barra dupla a quatro chaves. Este espectro foi obtido dos valores calculados individualmente para as manobras de energização de transformadores em vazio e curtos-circuitos em linhas de transmissão. Os valores das componentes de tensão (K_v) indicados na Figura 8 estão em "pu" do valor de crista fase-terra da tensão nominal (230kV). Para este padrão de arranjo físico, as tensões transitórias podem apresentar componentes de tensão importantes na faixa de freqüências de 10 a 200kHz, destacando-se as freqüências de 30kHz, 60kHz, 100kHz, 150kHz e 200kHz.

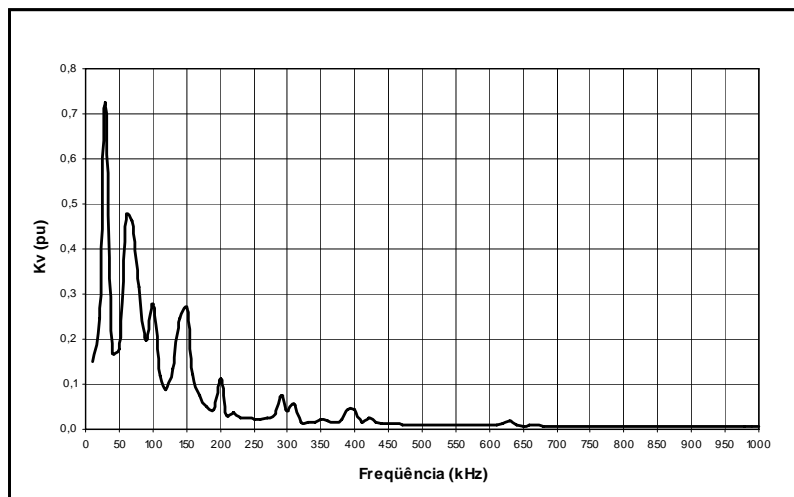


FIGURA 8 – Espectro de freqüências para a SE em barra dupla a quatro chaves

O espectro de freqüências da instalação pode ser inserido nas especificações técnicas como um requisito ou uma característica do sistema de transmissão. Esta informação permite que o fabricante do transformador conheça antecipadamente algumas características das tensões transitórias que podem ocorrer na subestação, e fornece elementos importantes para o desenvolvimento de um projeto adequado. Na especificação técnica também deve ser solicitado ao fabricante um modelo reduzido do transformador para estudos de tensões transitórias de alta freqüência, capaz de representar o transformador na faixa de freqüências de 1kHz a 1MHz. Este modelo deve permitir o cálculo das tensões transitórias nos terminais e em pontos internos dos enrolamentos e deve ser validado nos ensaios de resposta em freqüência, durante os testes de tipo na unidade protótipo.

Após uma primeira análise para identificar as faixas de freqüências críticas para o projeto, os casos mais severos podem ser novamente simulados utilizando o modelo reduzido, para obter as formas de onda e o espectro de freqüências correspondentes, possibilitando uma análise mais detalhada das solicitações impostas ao transformador numa etapa de revisão do projeto (design review).

6.0 - CONCLUSÕES

A forma de onda, a amplitude e o espectro de freqüências das tensões transitórias nos terminais dos transformadores, originadas por curtos-circuitos em linhas de transmissão ou manobras, é uma função do arranjo físico (layout) e da configuração de operação da subestação. A ocorrência de interação transitória do transformador com o sistema, gerando sobretensões internas ou nos terminais das buchas de menor tensão, depende das características intrínsecas do projeto do transformador. A entrada em operação de novos empreendimentos com modificações da configuração e ou do arranjo físico da subestação, ou eventos de menor porte como a instalação ou substituição de transformadores de potencial capacitivo (TPC) nas células dos transformadores pode alterar as características das tensões transitórias.

Apesar dos aspectos particulares deste fenômeno, os resultados da análise realizada indicam que é possível atuar preventivamente através de um estudo dos padrões de arranjo das subestações nas fases de planejamento e projeto, determinando as faixas de freqüências dominantes típicas e as correspondentes componentes de tensão. Incluir esta informação nas especificações técnicas de transformadores, como um requisito ou característica do sistema, permite que o fabricante do transformador conheça antecipadamente as características das tensões transitórias, possibilitando a elaboração de um projeto adequado para a aplicação, evitando ressonâncias perigosas nas faixas de freqüência especificadas.

Com as informações específicas do projeto e modelos adequados para a representação dos transformadores, os estudos elétricos, no âmbito do planejamento da operação, poderão avaliar a suportabilidade dos transformadores sob o aspecto da ressonância interna dos enrolamentos, definindo medidas ou instruções de operação adequadas para prevenir falhas internas ou curtos-circuitos em buchas, reduzindo os riscos de ocorrências na fase de operação comercial, que muitas vezes causam prejuízos financeiros significativos além dos efeitos negativos gerados pelas eventuais penalizações.

7.0 - BIBLIOGRAFIA

- (1) CONTENTE, A. D., et ali, Minimização dos Efeitos da Ressonância Parcial de Bancos de Transformadores, XI SNPTEE, outubro de 1991.
- (2) ROCHA, A., C., O., et ali, Análise de Falhas de Autotransformadores da SE São Gotardo 2 : Enfoque na Ressonância Parcial de Enrolamentos, XV SNPTEE, outubro de 1999.
- (3) MARTINS, H. J. A., et ali, Investigation About Failures in 500kV / 185 MVA Generator Transformers at Luiz Gonzaga Hydroelectric Plant. ISH 2001.
- (4) Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS), Requisitos Mínimos para Subestações e Equipamentos Associados, Submódulo 2.3 dos Procedimentos de Rede, dezembro de 2002.
- (5) IEEE Modeling and Analysis of System Transients Working Group, Modeling Guidelines for Fast Front Transients, IEEE Trans. on Power Delivery, january 1996.
- (6) CIGRÉ WG 33.02, Guidelines for Representation of Network Elements When Calculating Transients, 1990.
- (7) RIOUAL, M., et ali, Measurements and Computer Simulation of Fast Transients Through Indoor and Outdoor Substations, IEEE Trans. on Power Delivery, january 1990.
- (8) DEGENEFF, R. C., et ali, Modeling Power Transformers for Transient Voltage Calculations, CIGRE 1992 SESSION, paper 12-304.

8.0 - DADOS BIOGRÁFICOS

Antonio Roseval F. Freire, Nascido em Recife-PE em 1964, formou-se em Engenharia Elétrica pela UFPE em 1985, obteve o grau de Msc pela COPPE/UFRJ em 1991 e foi pós-graduado em Engenharia da Qualidade pela UFPE em 1995. Trabalha na CHESF desde 1985, com experiências nas áreas de especificação, ensaios e análise de desempenho de equipamentos de subestações e compensadores estáticos, e nas áreas de planejamento da operação e estudos elétricos de sistemas de potência. É membro individual do CIGRE.

Miguel Carlos Medina Pena, Nascido em Porto-Portugal em 1954, formou-se em engenharia Elétrica pela UPE em 1978, foi pós-graduado em Engenharia da Qualidade pela UFPE em 1996 e obteve o grau de Msc pela EFEI / Itajubá em 2003. Trabalha na CHESF desde 1979 na área de Manutenção de Equipamentos de Subestação. É membro individual do CIGRE.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à equipe do CEPEL, ao Serviço de Manutenção de Campina Grande e aos colegas Vespúcio Barros e Sylvania Barros pelo apoio e pelas importantes contribuições e discussões técnicas ao longo do desenvolvimento dos trabalhos.