



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

Sobre o Uso de Parâmetros S para Aprimorar Modelos de TP Indutivos Presentes em GIS

**GUSTAVO HENRIQUE DA COSTA OLIVEIRA(1); LUCAS PIOLI REHBEIN KURTEN IHLENFELD(2); LUCAS FARIAS MACIEL RODRIGUES(3); ANGELICA DA COSTA OLIVEIRA ROCHA(4); DIEGO JOSE DAMASCENO DO ESPIRITO SANTO(5);
UFPR(1);UFPR(2);UFPR(3);COPPEX(4);ESBR(5);**

RESUMO

Várias subestações elétricas de alta tensão em todo o mundo pertencem à classe de subestações isoladas a gás (GIS). Apesar das várias vantagens atribuídas a deste tipo de subestação, em razão de suas propriedades físicas intrínsecas, as GIS são suscetíveis à geração de Sobretensões Transitórias Muito Rápidas (VFTO). A modelagem detalhada dos arranjos físicos das GIS é importante para que possam obter resultados precisos de simulação dos VFTOs o que permite, como consequência, a construção de estratégias para a mitigação deste fenômeno. Os modelos a serem usados nestas simulações devem ser adequados para frequências que variam de 100 kHz a 50 MHz. Neste contexto, um dos equipamentos presentes em GIS de alta tensão pouco estudados em termos de modelagem de alta frequência são os TPIs. Este artigo apresenta, por um lado, uma motivação para o estudo de modelos de TPIs em uma larga faixa de frequências em GIS e, por outro lado, a proposta e análise da utilização de parâmetros S (ou espalhamento) neste contexto.

PALAVRAS-CHAVE

Subestação isolada a gás, transformador de potencial indutivo, transitórios de alta frequência, parâmetros Y, parâmetros S

1.0 - INTRODUÇÃO

Várias subestações elétricas de alta tensão em todo o mundo pertencem à classe de subestações isoladas a gás (GIS). Tais instalações apresentam vantagens em comparação com as subestações usuais, como menores requisitos de espaço, maior nível de segurança, facilidade de manutenção e comissionamento, etc. Apesar dessas vantagens, devido às suas propriedades físicas intrínsecas, as GIS são suscetíveis à geração de Sobretensões Transitórias Muito Rápidas (VFTO) que aparecem, por exemplo, logo após as manobras internas (como chaveamentos de seccionadoras) e que podem impactar a confiabilidade dos equipamentos. Como a instalação de GIS vem se tornando cada vez mais frequentes, essas questões se tornam também cada vez mais importantes para as concessionárias.

De fato, VFTO são transitórios eletromagnéticos caracterizados por ter um tempo de subida muito curto (4 a 100 ns). Possuem componentes de alta frequência (1 a 50 MHz), de frequência mais baixas (30 a 300 kHz) assim como a resposta em regime permanente [1]. É bem descrito na literatura os mecanismos levam a ocorrência de VFTO nas operações de GIS. Em [1,2], a origem do VFTO durante as operações de chaves seccionadoras e disjuntores em uma GIS é explicada. Basicamente, vários *pre-strikes* e *re-strikes* são gerados durante as manobras de abertura e fechamento, principalmente das chaves seccionadoras. Estes eventos de alta frequência são a origem dos VFTO. Sendo assim, o conhecimento dos efeitos dos VFTO na suportabilidade dielétrica dos equipamentos torna-se essencial para garantir a confiabilidade operativa. A modelagem detalhada dos arranjos físicos das GIS é importante para que possam obter resultados precisos de simulação dos VFTOs o que permite, como consequência, a construção de estratégias para a mitigação deste fenômeno.

Assumindo que medições confiáveis no domínio da frequência da matriz de admitâncias (parâmetros Y) de um determinado componente da subestação estão disponíveis, as abordagens de modelagem de caixa preta podem fornecer tais modelos, incluindo neste contexto, modelos de TP indutivos. No entanto, em altas frequências (geralmente, acima de 1 MHz), é difícil implementar fisicamente a necessária configuração de curto-circuito para a medição dos parâmetros Y. Assim, medidas acima desses limites podem ser imprecisas. Medições de parâmetros S são baseadas em sinais incidentes e refletidos em um dispositivo em teste. Algumas vantagens relacionadas aos parâmetros S são: fácil obtenção de medições de alta frequência, questões acima mencionadas relacionadas às condições dos terminais não se aplicam, possibilidade de calcular os parâmetros H, Y ou Z a partir de uma medição de parâmetro S.

Como os modelos de banda larga (acima de 1 MHz) são importantes para a análise precisa de eventos VFTO em instalações GIS, a contribuição deste artigo está na proposta de inclusão medidas de parâmetro S melhorar o conjunto de medições necessárias para a determinação de modelos caixa-preta de TPIs.

O artigo está organizado da seguinte forma. Na Seção 2, apresenta-se a motivação para este estudo. Na seção 3, descrevem-se os conceitos da representação de componentes do sistema elétrico através de parâmetros S, ou espalhamento, em comparação com os parâmetros Y. Na seção 4, traz-se dados de medição de parâmetros Y e S de um TPI de alta tensão, de classe equivalente ao da subestação apresentada na Seção 2. Na Seção 5, a análise destas medições Y e S é realizada e comparada. Faz-se também uso de um modelo híbrido Y e S para melhorar a representação do TPI na GIS. Na seção 6, o artigo é concluído.

2.0 - MOTIVAÇÃO

A Usina Hidrelétrica Jirau situada em Rondonia possui capacidade instalada de 3,750MW em duas casas de força nas situadas nas margens esquerda e direita do rio Madeira. Os geradores estão interligados à rede básica através de duas subestações de 500 kV, instaladas em cada uma das margens e isoladas a SF6 (GIS), denominadas Subestação Usina Hidrelétrica Jirau (SE UHJ).

As falhas de três transformadores de potencial indutivos 525kV (TPIs) isolados a SF6 na SE UHJ margem direita levaram a equipe técnica da Energia Sustentável do Brasil (ESBR), proprietária da Usina, a iniciar uma série de ações, com o objetivo de analisar as ocorrências. Constatou-se que a falha foi de origem dielétrica entre pontos internos ao enrolamento primário, próximo ao neutro, porém a sua causa principal não pode ser identificada. O enrolamento secundário não apresentou danos. A suspeita inicial foi a conexão de aterramento do neutro encontrada frouxa em um dos equipamentos, mas esse fato não se mostrou conclusivo. Dentro desse contexto, a ESBR concluiu ser necessária uma análise mais abrangente envolvendo medições de campo e simulações que serão discutidas nesse trabalho.

Duas falhas ocorreram no TPI da fase A da linha LT4 - LT5 (2,2 km) e outra falha ocorreu no TPI da fase A da L2 (93,2 km). A conclusão do fabricante foi que as falhas tiveram uma causa externa, não havendo associação com o projeto e fabricação dos equipamentos que estão de acordo com a especificação técnica. Tendo em vista o exposto acima e o histórico elevado de manobras de chaves seccionadoras da GIS UHJ, optou-se por focar as simulações de transitórios nesses eventos baseado em informações da ESBR

2.1 Modelagem da GIS

A margem direita da GIS UHJ foi modelada por partes com o programa de transitórios eletromagnéticos EMTP-RV. Esse programa possibilita a modelagem dos equipamentos indutivos através de matrizes espaço-estado calculadas a partir das medições de campo de admitâncias em função da frequência. No caso específico dos TPIs em análise, essas medições foram realizadas e modelo calculado conforme mostrado em [2].

Os equipamentos da GIS foram modelados da forma tradicionalmente considerada na literatura [1], [3] [4] conforme a seguir : Pára-raios, chaves seccionadoras, chaves de aterramento, buchas e disjuntores fechados : capacitâncias concentradas para terra com os valores recomendados em [3]; Disjuntores abertos : capacitâncias de 20 pF dos terminais para terra e 757 pF (capacitores de acoplamento) entre terminais; Transformadores de correntes : capacitâncias concentradas de 20 pF para terra; Transformadores de potencial indutivo : capacitância concentrada de 157,6 pF para terra (medição em 60 Hz fornecida pela ESBR); Transformadores de potencial indutivo em análise: capacitância concentrada de 157,6 pF para terra (modelo simplificado) e modelo em espaço de estados dos parâmetros Y com 1 terminal, opção control /state-space do EMTP-RV (modelo avançado) [5]; Barramentos : modelo de cabo não transposto com parâmetros variáveis com a frequência calculados pelo EMTP-RV a partir dos dados elétricos e geométricos dos condutores e arranjo físico da GIS (FDQ-model); Tranformador elevador: modelo fornecido para altas frequencias (RLC concentrados), fornecido pelo fabricante

2.1 Metodologia e Resultados de Simulação

Nesse estágio da análise, o objetivo principal foi comparar a tensões transitórias obtidas com os dois modelos, simplificado e avançado, simulando-se a manobra de uma das chaves seccionadores apontada pela ESBR com histórico de número significativos de operações pré - ocorrência. Modelou-se um setor da GIS UHJ margem direita , compreendendo os vão dos transformadores elevadores T1 a T4 e as saídas das duas linhas para Porto Velho.

O comportamento da reignição durante a abertura da chave foi representado por uma resistência fixa de 0,5 ohms em série com outra resistência que decresce exponencialmente com o tempo, $R(t) = R_0 \exp(-t/T)$, onde $R_0 = 1012$ ohms e $T = 0.6$ ns, que resulta em uma disrupção com duração de cerca de 50ns [1]. Foi considerada uma carga residual de 428 kV (1,05pu) do terminal oposto à fonte de tensão, caso mais crítico.

Simulou-se a ocorrência de uma reignição manobra da chave 1151 (vão de by-pass do disjuntor da LT2), estando o disjuntor da linha aberto e a chave 1159 também aberta. O comportamento da reignição durante a abertura da chave foi representado por uma resistência fixa de 0,5 ohms em série com outra resistência que decresce exponencialmente com o tempo, $R(t) = R_0 \exp(-t/T)$, onde $R_0 = 1012$ ohms e $T = 0.6$ ns, que resulta em uma disrupção com duração de cerca de 50ns [1]. Foi considerada uma carga residual de 428 kV (1,05pu) do terminal oposto à fonte de tensão, caso mais crítico.

Simulou-se a ocorrência de uma reignição manobra da chave 1151 (vão de by-pass do disjuntor da LT2), estando o disjuntor da linha aberto e a chave 1159 também aberta. Diferentes abordagens para modelagem do reacendimento do arco durante a abertura da chave de uma chave seccionadora numa GIS são apresentadas na literatura [1]. Nessa etapa do estudo, esses modelos não foram considerados, à título de simplificação. Considerou-se apenas uma carga residual de 428 kV (1,05pu) no terminal da chave sem tensão, com polaridade oposta à da fonte do sistema.

A Tabela 1, contém os valores máximos das sobretensões e as taxas de variação da tensão inicial encontradas para os dois modelos. A figura 1 apresenta as sobretensões encontradas e a comparação entre elas para os dois modelos

TABELA 1 - Sobretensões transitórias TPI L2 Fatores de severidade máxima densidade espectral por faixa de frequência para abertura com reignição – Chave 1151

Modelo TPI	Sobretensões transitórias TPIL2		Fator de severidade máximo SF Densidade espectral DS		
	Valor máximo kVpico	Taxas de variação (MV/ μ s)	Freq (MHz) SF _{max}	SF máximo	Faixa de frequência DS igual ou superior à normalizada (MHz)
Modelo simplificado	490	3,5	16	446	1 a 20 MHz
Modelo avançado	475	2,8	3,6	25	1 a 20 MHz

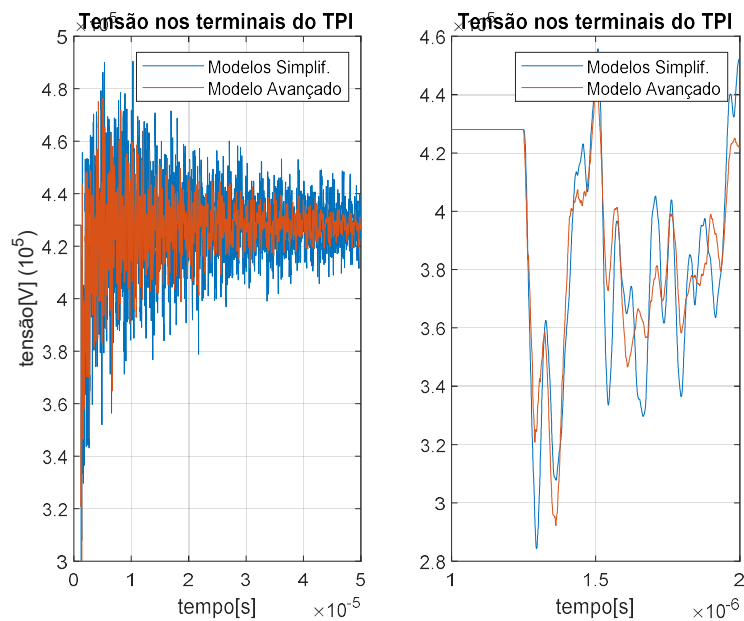


FIGURA 1 - Tensão nos terminais do TPI da L2. Manobra chave 1151 com reignição.

Observa-se que os valores máximos das sobretensões não variaram de forma significativa para os dois modelos. A taxa de crescimento foi 20% inferior para o modelo avançado. Esse modelo apresentou também uma maior atenuação. Essa característica irá se refletir na análise no domínio da frequência.

Além da análise no domínio do tempo, foi realizada análise dos transitórios no domínio da frequência conforme metodologia apresentada em [6]. Para os dois modelos, comparou-se a densidade espectral (DS) das sobretensões com o da onda 1550 kV, 1,2/50 μ s (Nível de isolamento especificado). A partir dessa comparação, calculou-se o fator de severidade do domínio da frequência (FDSF). O valor de FDSF menor que 1 (um) significa que a tensão transitória em análise, que apresenta uma forma de ondas não padronizada, foi bem caracterizada pelos ensaios dielétricos de fábrica. Esse fator pode ser, portanto, considerado como um indicativo da suportabilidade do TPI às essas solicitações caso o equipamento tenha passado nos ensaios. A Tabela 1 apresenta os resultados encontrados dessa análise. As Figuras 3 a 6 apresentam a densidade espectral e fator de severidade para os dois modelos adotados para o TPI.

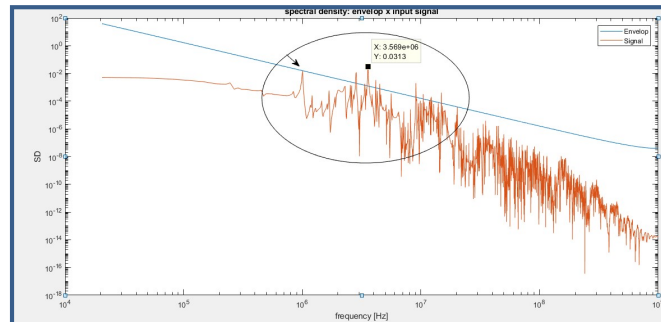


FIGURA 3 - Densidade espectral (laranja) associada a onda padronizada de ensaio (azul), Modelo Avançado

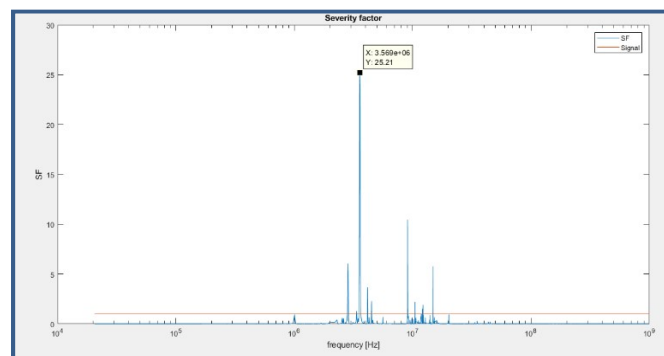


FIGURA 4 - Fator de severidade associada a tensão transitória. Modelo Avançado

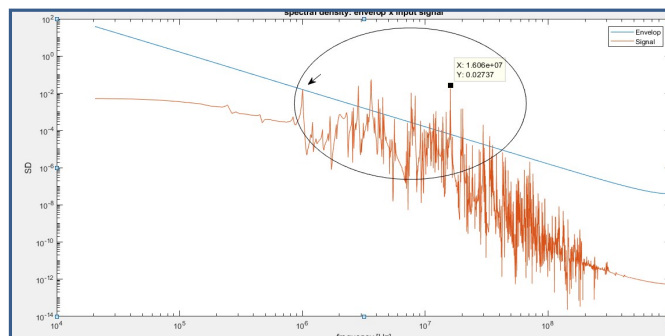


FIGURA 5 - Densidade espectral (laranja) associada a onda padronizada de ensaio (azul), Modelo Simplificado.

Observa-se que o modelo simplificado dá origem a tensão transitória com espectro de frequência mais elevado do que o modelo avançado. Esse fato se reflete no observado para as tensões no domínio do tempo. O maior fator de severidade, por exemplo, foi para frequência de 16 MHz para o modelo simplificado e 3,6 MHz para o avançado. Considerando essa metodologia, as sobretensões encontradas não estariam cobertas pelos impulsos dielétricos de norma em todo o espectro de frequência.

Adicionalmente, foram realizadas simulações de manobra de energização das linhas L2 para Porto Velho e L4-L5 para margem esquerda, já que uma das ocorrências (TPI terminal L2) coincidiu com a energização de uma dessas linhas. Porém, as sobretensões transitórias encontradas foram de baixa amplitude (582 kV/1,4 pu) e muito

amortecidas, devido a presença de resistores de pré-energização de 1000 ohms. Concluiu-se, portanto, que essas manobras teriam muito baixa probabilidade de ter sido a causa original das falhas.

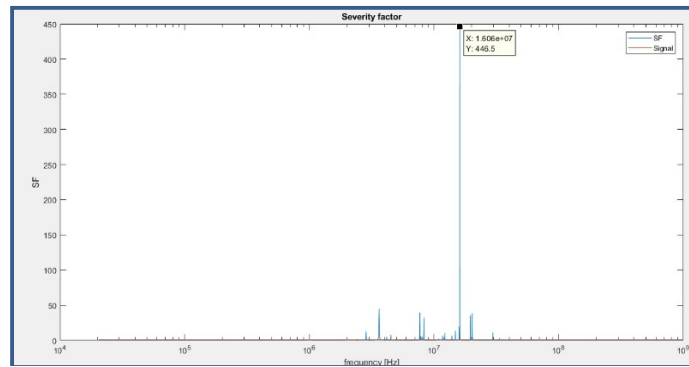


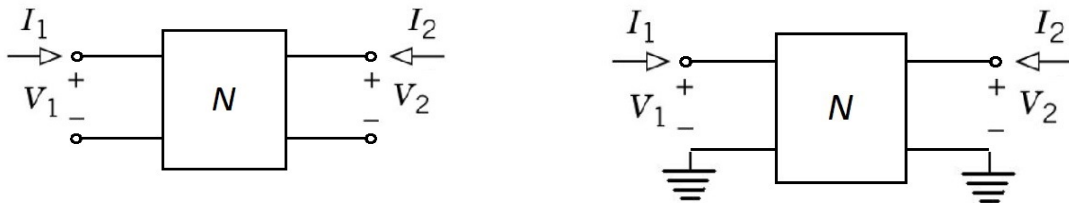
FIGURA 6 - Fator de severidade associada a tensão transitória. Modelo Simplificado.

3.0 - DESCRIÇÃO INTERATIVA DE COMPONENTES DO SISTEMA ELÉTRICO

Dentre as diferentes formas de caracterização multi-porta de componente do sistema elétrico, destaca-se a conhecida como Parâmetros Admitância ou \mathbf{Y} , ver equação (1). Esta representação possui a propriedade de possibilitar interação do componente ou circuito com os demais componentes a ela conectada.

$$\mathbf{I}(j\omega) = \mathbf{Y}(j\omega) \mathbf{V}(j\omega). \quad \text{Equação (1)}$$

Nesta equação $\mathbf{I}(j\omega)$ e $\mathbf{V}(j\omega)$ são vetores dependentes da frequência que representam as correntes e tensões nos terminais do componentes, conforme Figura 13. Na Figura 7(a), ilustra-se um componente com duas portas, quatro terminais. Quando um dos terminais do componente está aterrado, caso frequente em simulações do setor elétrico, tem-se a Figura 7(b), sendo este o caso de duas portas, dois terminais.



(a) (b)
FIGURA 7 – Representação de um componente com duas portas.

A representação Admitância do componente da Figura 14(b) é dada pela equação (2).

$$\begin{bmatrix} I_1(j\omega) \\ I_2(j\omega) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{11}(j\omega) & Y_{12}(j\omega) \\ Y_{21}(j\omega) & Y_{22}(j\omega) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_1(j\omega) \\ V_2(j\omega) \end{bmatrix} \quad \text{Equação (2)}$$

O processo de obtenção dos parâmetros \mathbf{Y} está bem documentado na literatura. Assumindo que o terminal 1 está aberto, a relação de transferência de tensão entre o terminal 2 para 1 pode ser calculada através da equação (3). Analogamente, a relação entre o terminal 1 para 2 é dada pela equação (4).

$$V_{12}(j\omega) = -Y_{11}(j\omega)^{-1}Y_{12}(j\omega) \quad \text{Equação (3)}$$

$$V_{21}(j\omega) = -Y_{22}(j\omega)^{-1}Y_{21}(j\omega) \quad \text{Equação (4)}$$

Outra forma frequente de caracterização multi-porta de componentes e circuitos é a conhecida como Parâmetros Espalhamento, Scattering ou Parâmetros \mathbf{S} . Esta representação não está baseada em valores de corrente e tensão nos terminais, mas sim no conceito de ondas incidentes e refletidas. A ilustração deste conceito está na Figura 8, sendo V^+ e V^- as ondas incidentes e refletidas nas portas 1 e 2 do equipamento.

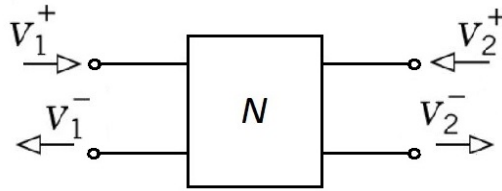


FIGURA 8 – Representação Espalhamento um componente com duas portas.

A equação representativa dos parâmetros espalhamento é:

$$\mathbf{V}^-(j\omega) = \mathbf{S}(j\omega) \mathbf{V}^+(j\omega) \quad \text{Equação (5)}$$

sendo $\mathbf{V}^+(j\omega)$ e $\mathbf{V}^-(j\omega)$ são vetores dependentes da frequência que representam as ondas incidentes e refletidas nos terminais do equipamento. A representação Espalhamento do componente da Figura 8 é dada pela equação (6).

$$\begin{bmatrix} V_1^-(j\omega) \\ V_2^-(j\omega) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11}(j\omega) & S_{12}(j\omega) \\ S_{21}(j\omega) & S_{22}(j\omega) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_1^+(j\omega) \\ V_2^+(j\omega) \end{bmatrix} \quad \text{Equação (6)}$$

A representação de Parâmetros \mathbf{Y} de um mesmo componente multi-porta pode ser convertida Parâmetros \mathbf{S} e vice-versa. De particular interesse em neste artigo, a conversão de Parâmetros \mathbf{S} para \mathbf{Y} é dada pela Equação (7). Nesta equação \mathbf{Z}_o é a resistência de referência, usualmente utilizada como sendo 50 ohms.

$$\mathbf{Y}(j\omega) = \sqrt{\mathbf{Z}_o}^{-1} (\mathbf{I} - \mathbf{S}(j\omega)) (\mathbf{I} + \mathbf{S}(j\omega))^{-1} \sqrt{\mathbf{Z}_o}^{-1} \quad \text{Equação (7)}$$

4.0 - RESULTADOS DE MEDIÇÃO DE PARÂMETROS Y E S EM TPI

Nesta seção, apresentam-se os resultados de medição dos Parâmetros \mathbf{S} e \mathbf{Y} de um TPI isolado a SF6, 550/0,1166 kV, 400 VA, 60 Hz. Estes dados estão sendo utilizados pois é um equipamento de porte e classe de tensão equivalente ao estudo de caso apresentado na Seção 2. Estas medições foram realizadas pelos Institutos Lactec, Curitiba/PR.

A Figura 9 contém os dados de medição dos Parâmetros \mathbf{S} e \mathbf{Y} . Nesta Figura, o terminal de alta tensão do TPI é o terminal 1, enquanto que o terminal de baixa tensão é o terminal 2.

5.0 - ANÁLISE

Na Figura 9, à esquerda, nota-se que os elementos de medição correspondentes à diagonal da matriz, elementos S_{11} e S_{22} , estão próximos de 0 dB, indicando a onda refletida é próxima da onda incidente. Nos elementos fora da diagonal, tem-se a transmissão da onda da porta 1 (terminal H de alta tensão) para a porta 2 (terminal 1a2 de baixa tensão). A transmissão é baixa (< -60 dB), consistente com os elementos da diagonal. Estes resultados são consistentes com este equipamento que se caracteriza por ter alta impedância. Nota-se a interferência de sinais de 60 Hz na medição do elemento (2,2) da matriz de parâmetros \mathbf{S} . À direita, também na Figura 9, nota-se a alta impedância do enrolamento de alta tensão em uma larga faixa de frequências, o que não ocorre no enrolamento de baixa tensão. A medição do enrolamento de baixa tensão para o de alta tensão não foi obtida por razões prática de possível dano ao equipamento de medição devido a alta relação de transformação do TPI.

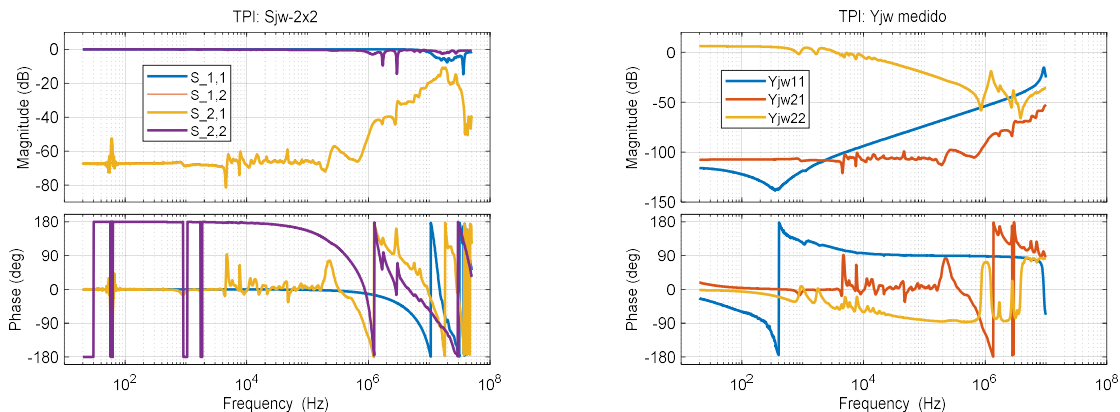


FIGURA 9 – Medição de Parâmetros \mathbf{S} (esquerda) e \mathbf{Y} (direita) em um TPI de 550 kV.

5.1 Transformação entre representações

Visando obter uma representação multi-portas com Parâmetros Admitância Y , a partir dos Parâmetros Scattering S medidos, foi utilizada a equação (7) e o resultado é apresentado nas Figuras 10 e 11.

O primeiro aspecto que se destaca é a ampliação da faixa de frequências dos Parâmetros Admitância do TPI com a utilização de Parâmetros Y , calculados a partir dos Parâmetros S , em relação aos Parâmetros Y medidos diretamente. Em particular, o limite em alta frequência passa de 10 a 50 MHz. Na sequência, os Parâmetros Y calculados a partir dos Parâmetros S serão denominados de “convertidos” para diferenciá-los dos parâmetros Y medidos diretamente, denominado de “direta”.

Os elementos da representação multi-portas convertidos e medidos serão comparados. Em relação ao elemento Y_{11} , admitância própria do terminal de alta tensão, nota-se que existe uma divergência até 10 kHz entre as medidas convertida e direta. A causa provável desta divergência pode ser a faixa de operação do equipamento de medição de parâmetros S não compatível com esta região de alta impedância. No caso da admitância própria do terminal de baixa tensão, o elemento Y_{22} , a divergência é a menor observada e vai até próximo de 5 kHz.

Na Figura 11, tem-se a admitância mútua entre terminal de baixa para alta tensão, elemento Y_{12} . Neste caso a divergência observada é em uma faixa maior que a do elemento Y_{11} , vai até próximo de 1 MHz. A causa provável desta divergência pode ser também a faixa de operação do equipamento de medição de parâmetros Y , que precisa comparar sinais de magnitude muito diferente.

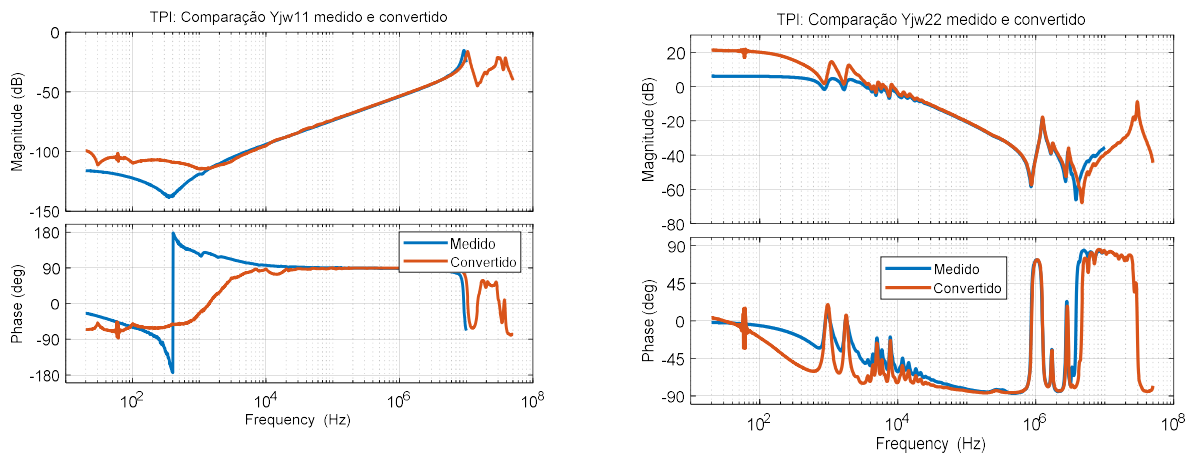


FIGURA 10 – Comparação entre o cálculo da admitância própria da alta tensão (esquerda) e baixa tensão (direita) pelos Parâmetros S e a medição direta

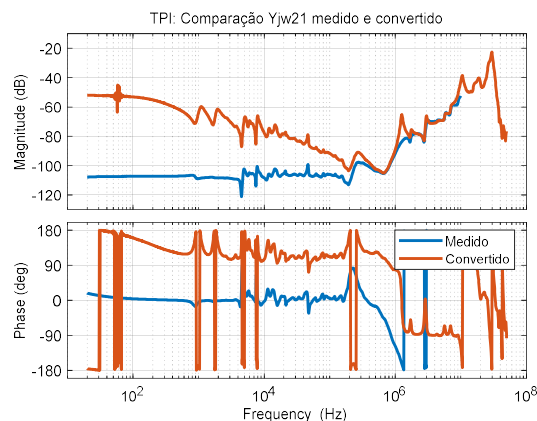


FIGURA 11 – Comparação entre o cálculo da admitância mútua pelos Parâmetros S e a medição direta

5.2 Transferência de tensão

O segundo item observado é a capacidade das medições de reproduzir as propriedades de transferência de tensão do TPI. Conforme dados de placa, a relação de transferência em 60 Hz é de 550kV para 116,6 V e vice versa. Isso é equivalente a $\pm 73,4$ dB. Para tanto, utilizou-se a Equação (6). Os resultados estão apresentados na Figura 12. Nesta Figura, tem-se a comparação entre a aplicação da Equação (6) nos parâmetros Y diretos e convertidos, juntamente com a transferência de tensão medida diretamente no equipamento (só presente na Figura (12), à esquerda).

O segundo item observado é a capacidade das medições de reproduzir as propriedades de transferência de tensão do TPI. Conforme dados de placa, a relação de transferência em 60 Hz é de 550kV para 116,6 V e vice versa. Isso é equivalente a $\pm 73,4$ dB. Para tanto, utilizou-se a Equação (6). Os resultados estão apresentados na Figura 19. Nesta Figura, tem-se a comparação entre a aplicação da Equação (6) nos parâmetros **Y** diretos e convertidos, juntamente com a transferência de tensão medida diretamente no equipamento (só presente na Figura (19), à esquerda).

Na Figura 12, nota-se que as transferências de tensão do terminal de alta para o de baixa tensão, com os parâmetros **S** possui alta aderência de valores, principalmente até aprox. 1 MHz. Já a transferência calculada com os parâmetros **Y** não foi validada. Através da Equação (6), este resultado valida as medidas Y22 e Y21 na forma convertida ao contrário da forma direta.

Nesta mesma Figura 12, tem-se também a transferência de tensão do terminal de baixa para o de alta tensão. Neste caso, não é possível medição direta da transferência para fins comparativos. Fez a comparação com a relação de tensão em 60 Hz. Neste caso, tanto o cálculo com os dados direto e convertido não reproduziram a relação esperada. Através da equação (6), no caso dos dados diretos, pode-se estender o mesmo resultado anterior. Para o caso dos dados convertidos, faz-se aqui referência à Figura (10), onde a baixa frequência pode estar fora da faixa de operação do equipamento de medição dos parâmetros **S**.

Portanto, neste artigo, propõe-se uma medição híbrida para o elemento Y11, contendo dados da medição direta até 10 kHz e dados da medição convertida após 10kHz. Aplicando a equação (6) na nova matriz de Parâmetros **Y**, denominada aqui de híbrida, o resultado da relação de transformação é consistente com a relação de placa do equipamento.

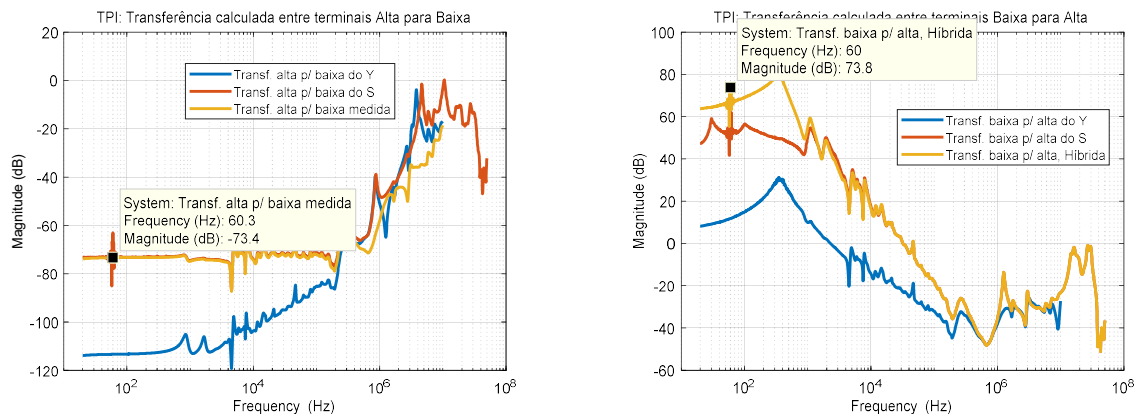


FIGURA 12 – Comparação entre a transferência de tensão do terminal de alta para baixa tensão (esquerda) e baixa para alta tensão (direita) calculada com os dados convertidos, medidos e medida diretamente.

6.0 - CONCLUSÕES

Este trabalho introduziu a utilização de parâmetros **S** para medição e posterior obtenção de modelos de larga faixa de frequências de transformadores de potencial indutivo.

A motivação do problema foi apresentada. Observou que as falhas de três transformadores de potencial indutivos 525kV (TPIs) isolados a SF6 na SE UHJ margem direita motivaram a equipe técnica da Energia Sustentável do Brasil (ESBR) a iniciar uma série de ações, dentre elas simulações de VFT, para subsidiar a análise das falhas. As simulações foram realizadas considerando dois modelos para os TPIs, um simplificado e outro avançado a partir de medições de parâmetros **Y** e **S**. Ambos os modelos deram origem a sobretensões com espectro frequência elevados, não cobertos pelas ondas padronizadas e cujos efeitos deverão ser discutidos com o fabricante.

No que diz respeito às medições de parâmetros **Y** e **S** para a determinação de modelos caixa-preta do TPI chegou-se à conclusão que o procedimento usual de parâmetros **Y** não foi suficiente para levar a um modelo confiável. Melhores resultados foram obtidos com a medição de parâmetros **S**.

A medição dos parâmetros **S** conseguiu com maior confiabilidade ao reproduzir a relação de transformação entre terminais de alta para baixa tensão, validando assim os elementos Y22 e Y12 na forma convertida. A relação de transformação entre terminais de baixa para alta tensão levou a necessidade de uma correção no elemento Y11 convertido. Foi então proposto uma forma híbrida, com parte de medição direta e convertida, forma esta que conseguiu reproduzir a relação de transformação de placa (isto é, a 60 Hz), validando a transformação.

7.0 - AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao apoio financeiro do Projeto PD-6631-0006/2017, projeto este regulamentado pela ANEEL e desenvolvido no âmbito do programa de P&D da Energia Sustentável do Brasil S.A.

Os autores também agradecem aos pesquisadores Ricardo, Arinos, Mathias e Vinícius, dos Institutos Lactec, pela realização das medições apresentadas na Figuras 9 e pelas proveitosas conversas a respeito do assunto.

8.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) Report Prepared by the Fast Front Transients Task Force of IEEE - "Modeling Guidelines for Fast Front Transients" – IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 11, nº1, January 1996.
- (2) CIGRE Working Group 33.02. "Guidelines for Representation of Networks Elements When Calculating Transients", 1990.
- (3) Hun-chu. Analysis of Magnitude and Rate -of-rise of VFTO in 550 kV GIS using EMTP-RV. Electr Eng Technol Vol. 8, n.1, pp. 11-19, 2013.
- (4) Tian chin. Comparison and analysis on Very Fast Transient Overvoltage based on 550 kV GIS and 800 kV GIS. International Conference on High Voltage Engineering and Application, 2008
- (5) L. P. R. K. Ihlenfeld, G. H. C. Oliveira, A. C. O. Rocha, D. J. D. E. Santo, Modelagem em Larga Faixa de Frequências de TP Indutivos para análise de falhas devido a VFTO. XVIII ERIAC, 2019.
- (6) Cigre Technical Brochure 577A, 577 B "Electrical transient interaction between transformers and the power system" JWG A2/C4.39.

9.0 - DADOS BIOGRÁFICOS



Gustavo Henrique da Costa Oliveira graduou-se em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Juiz de Fora em 1988, Mestre em Engenharia Elétrica pela Universidade Estadual de Campinas em 1992, Doutor em Engenharia pela Universidade de Nice Sophia-Antipolis, França, e Doutor em Engenharia Elétrica pela Universidade Estadual de Campinas em 1997. Atualmente, é Professor Adjunto do Departamento de Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Paraná. Suas atividades de pesquisa incluem: identificação de sistemas, sistemas de controle em malha fechada, modelagem caixa-preta de equipamentos de alta-tensão, controle de carga/frequência na geração de energia elétrica, monitoramento de sistemas elétricos a pequenas perturbações.

Lucas P. R. K. Ihlenfeld graduou-se em Engenharia Elétrica pela Universidade Tecnológica Federal do Paraná em 2010, Mestre em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal do Paraná em 2015. Atualmente, é doutorando pela Universidade Federal do Paraná com pesquisas nas áreas de concentração em otimização convexa e teoria de grafos aplicadas à identificação de sistemas e modelagem caixa-preta de transformadores.

Lucas Farias Maciel Rodrigues graduou-se em Engenharia Elétrica pela Universidade Estadual de Santa Cruz em 2017. Atualmente é aluno de mestrado em Engenharia Elétrica na Universidade Federal do Paraná na área de Controle e Automação. Suas áreas de pesquisa atuais são: identificação de sistemas, modelagem caixa-preta e análise de sistemas lineares. Tem experiência também em inteligência artificial aplicada a sistemas de apoio a decisão, aprendizagem de máquina e sistemas de previsão.

Angélica da Costa Oliveira Rocha graduou-se em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Juiz de Fora, Engenheira Eletricista com mais de 30 anos de experiência em estudos elétricos envolvendo transitórios eletromagnéticos, qualidade de energia, superação de equipamentos e análise de especificações e design review elétrico de transformadores e reatores. Trabalhou a maior parte de sua carreira como engenheira sênior na CEMIG e hoje atua como consultora na ATG Engenharia. Atualmente é coordenadora do comitê C4 do Cigre Brasil.