

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

SISTEMA DE MEDIÇÃO PARA SOLICITAÇÕES TRANSITÓRIAS EM TRANSFORMADORES DE CORRENTE PARA ALTA TENSÃO

CARLOS MAGNO RODRIGUES VASQUES(1); RÔMULO DOS SANTOS DELGADO(1); LUIZ EDUARDO DIAS SANTOS(1); DICKSON SILVA DE SOUZA(1); ITALO FORADINI DA NOVA(1); GABRIELA SAMPAIO REMA(1)(2); MARCIO THELIO F DA SILVA(1); LEONARDO TORRES BISPO DOS SANTOS(1);

CEPEL (1) - UNIFEI (2)

RESUMO

Manobras de seccionadores e disjuntores, curtos-circuitos e descargas atmosféricas geram solicitações transitórias com um amplo espectro de frequências aos equipamentos elétricos que fazem parte do Sistema Interligado Nacional (SIN). Considerando particularmente transformadores de corrente para alta tensão, um elevado número de falhas vem sendo motivo para uma série de investigações, de modo a esclarecer as possíveis causas.

O Centro de Pesquisas em Energia Elétrica (CEPEL) vem recebendo recorrentes demandas para prover avaliações de sobretensões transitórias em transformadores de corrente (TC), especificamente, durante manobras de seccionadores. Assim sendo, iniciou-se um estudo para o desenvolvimento e avaliação de um sistema de medição capaz de realizar medições de sobrecorrentes transitórias que percorrem o corpo condutivo do TC e, a partir destes resultados, avaliar sobretensões transitórias às quais o mesmo pode ser submetido. A priori, para avaliação e medição de eventos transitórios, o sistema deve ter um desempenho dinâmico adequado para quantificar os transitórios e sobrecorrentes geradas, frequentemente, com componentes de frequência da ordem de dezenas a centenas de kHz.

PALAVRAS-CHAVE

Medição de solicitações transitórias, Transformadores de corrente, Sobretensões transitórias, Sobrecorrentes transitórias, Desempenho dinâmico

1.0 - INTRODUÇÃO

Apesar da robustez que o Sistema Interligado Nacional (SIN) apresenta, possíveis modos de falha podem ocorrer em qualquer componente do sistema quer seja de geração ou de transmissão. Uma grande parte dos defeitos pode ser identificada por técnicas preditivas e, se identificada, monitorada com o objetivo de estabelecer ações que impeçam a evolução dos defeitos até uma falha. Existe, no entanto, uma parcela de defeitos que não sensibiliza as técnicas preditivas criando condições para uma possível falha, e que, particularmente nestes casos, é caracterizada como uma falha súbita. Embora esta seja uma parcela pequena em relação a todos os tipos de falha, não pode ser desconsiderada para as análises e a manutenção da integridade e confiabilidade do SIN.

Considerando particularmente TCs para alta tensão, um elevado número de falhas vem sendo motivo para uma série de investigações de modo a esclarecer as possíveis causas. TCs para alta tensão são equipamentos de

grande importância para o sistema elétrico uma vez que acumulam funções de proteção e medição de corrente elétrica em variadas magnitudes, sem os quais, estes e outros ativos podem estar sujeitos a fenômenos, seja de regime permanente ou transitório, que podem levá-los à falha, implicando assim em prejuízos econômicos, na confiabilidade do sistema, além de questões relacionadas à segurança dos trabalhadores envolvidos em manutenção.

Este trabalho apresenta um sistema de medição desenvolvido para avaliação de eventos transitórios em TCs para alta tensão com foco nos seus resultados e desempenho dinâmico. O sistema de medição é prático e não requer muito tempo para instalação no campo, pois utiliza o ponto de aterramento do TC à subestação. Técnicas utilizadas para levantamento das características de desempenho desse sistema de medição, necessárias para medição qualitativa e quantitativa, na avaliação destas solicitações transitórias são elucidadas comprovando assim a adequação do mesmo para medições de sinais transitórios no laboratório e aplicações no campo.

2.0 - METODOLOGIA DO SISTEMA DE MEDIÇÃO

Conceitualmente, um sistema de medição (SM) é o conjunto completo de dispositivos adequados para medir [1]. Quando a necessidade de medição envolve uma grandeza elétrica, por exemplo, uma medição de tensão com algumas unidades de microvolt (μV) até o limite de 1000 V, estas medições podem ser realizadas ou comparadas diretamente pelos instrumentos convencionais de medição. Entretanto, quando da necessidade de medições de tensões que contemplam valores acima de 1000 V e até unidades de megavolt (MV) há a necessidade de atenuação da tensão em níveis que possam ser diretamente medidos pelos instrumentos. A atenuação deve ser fidedigna aos níveis de tensão do sinal de interesse e a avaliação de outros fatores envolvidos deve ser observada, tais quais: frequências associadas ao sinal de interesse, relação sinal/ruído, compatibilidade eletromagnética, aspectos de segurança dos operadores desses instrumentos, entre outros. Para um SM de alta tensão (>1000 V) os componentes básicos são apresentados na Figura 1.

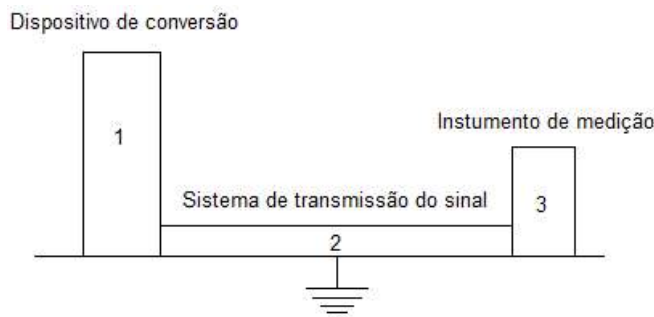


FIGURA 1 – Componentes básicos de um SM utilizado em alta tensão

Em um primeiro momento, na necessidade de medições e avaliações de sobretensões transitórias em um TC durante manobras numa subestação (SE), é possível considerar a instalação de divisores de potencial capacitivo no sistema de potência atendendo assim a um SM que pode ser utilizado em alta tensão. Entretanto, esta possibilidade pode não ser a mais aconselhável quando se pretende avaliar frequências acima de centenas de kHz, uma vez que a inserção de uma capacitância não intrínseca no trecho a ser medido, se comparável àquela do barramento, pode afetar diretamente as medições com alterações nos parâmetros de amplitudes e frequências, prejudicando a avaliação dos resultados. Além disto, nem sempre são apropriados ou estão disponíveis para permanecer por longos períodos ao tempo.

Assim sendo, o SM desenvolvido deve se apresentar como uma alternativa viável para a avaliação de sobretensões transitórias no TC, ao mesmo tempo eliminando a possibilidade de uma possível modificação da capacitância do barramento onde o equipamento se encontra instalado. Para tanto, propõe-se a medição da sobrecorrente transitória que flui pelo corpo condensivo do equipamento de alta tensão, no caso particular o

10 a 13 de novembro de 2019
Belo Horizonte - MG

transformador de corrente, quando submetido a uma manobra na SE. Esta sobrecorrente é medida na cordoalha de terra do TC e, conhecendo-se a impedância do mesmo, calcula-se a sobretensão que surge no terminal do equipamento. A Figura 2 apresenta os componentes básicos do SM desenvolvido no CEPEL.

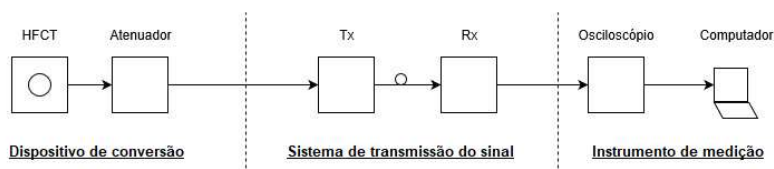


FIGURA 2 – Componentes básicos de um SM desenvolvido

As medições de sobrecorrentes transitórias necessitam de sensores de corrente com características específicas quanto ao nível de sensibilidade, resposta ao tempo de subida, banda de frequência, entre outros. Além destas características específicas, a medição com o sensor deve ser não invasiva, prática e não requerer muito tempo para instalação no laboratório ou campo. Os sensores adotados são conhecidos como transformadores de corrente para alta frequência (High Frequency Current Transformer – HFCT), no caso específico da aplicação foi considerado o HFCT da PEARSON mod. 3525 que tem uma largura de banda de 5 Hz – 15 MHz, tempo de subida de 25ns e corrente máxima de pico igual a 5 kA, sendo os mesmos apresentados na Figura 3.

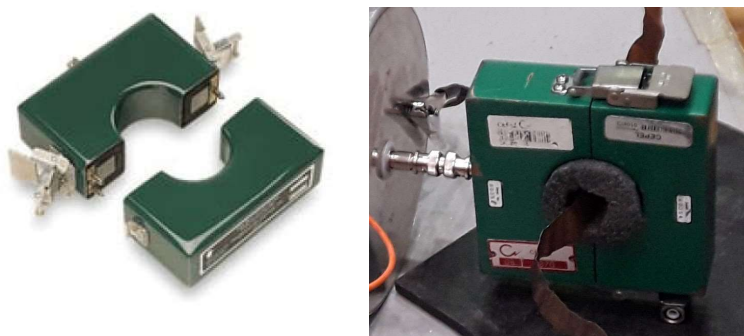


FIGURA 3 – Transformador de corrente para Alta Frequência (HFCT)

Os demais componentes do SM, similarmente ao HFCT, devem apresentar características específicas quanto ao nível de sensibilidade, resposta ao tempo de subida, banda de frequência, entre outros. Na Figura 4 está representado um esquema com cada componente do SM conectado à cordoalha de aterramento do TC.

10 a 13 de novembro de 2019
Belo Horizonte - MG

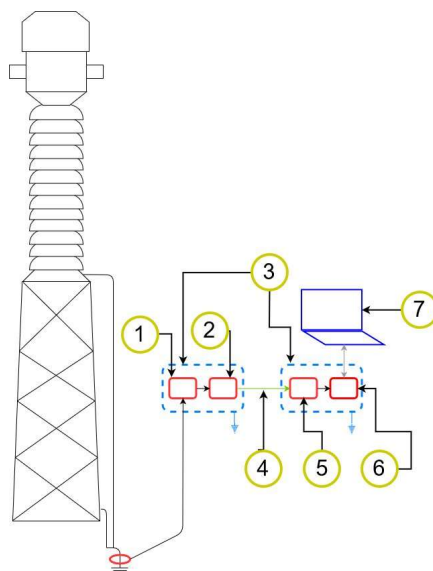


FIGURA 4 – Esquema simplificado com cada componente do sistema de medição conectado à cordoalha de aterramento do TC

O arranjo completo utilizado para realizar as medições abrange a integração de: 1 – Atenuador, 2 – Transmissor de fibra óptica, 3 – Blindagem eletromagnética, 4 – Fibra óptica, 5 – Receptor do sistema óptico, 6 – Osciloscópio e 7 – Notebook para controle e aquisição de dados.

3.0 - METODOLOGIA PARA AVALIAÇÃO DO SISTEMA DE MEDIÇÃO

Para a avaliação de desempenho do SM foram utilizadas em conjunto as técnicas de medição já conhecidas, tais como: resposta ao degrau unitário e resposta em frequência, além das comparações dos resultados de aplicação de impulso de corrente com um SM de referência.

A resposta ao degrau unitário $g(t)$ consiste em avaliar a resposta do SM quando um degrau de tensão com tempo de subida de $\cong 5$ ns é aplicado aos terminais de entrada. A resposta em frequência $g(f)$ consiste em aplicar um sinal de tensão senoidal na entrada do atenuador, com frequência variando entre 20 Hz até 10 MHz, e medir a saída do receptor de fibra óptica. A função de transferência (relação saída x entrada) é normalizada pelo fator de escala (FE) do SM e caracteriza a resposta em frequência do sistema. As comparações dos resultados de aplicação de impulso de corrente com um SM de referência consistem em aplicar impulsos de corrente avaliando o desempenho do HFCT e de todos os componentes do SM medindo na saída do receptor de fibra óptica. Toda avaliação é realizada observando o valor de pico e parâmetros no tempo. Foram aplicados impulsos de corrente $8/20\mu s$ podendo-se estabelecer como valor máximo de corrente 20 kA.

3.1 VERIFICAÇÃO DE DESEMPENHO DO SISTEMA DE MEDIÇÃO

Na Figura 5 é apresentado o resultado da verificação de desempenho no domínio do tempo pela resposta ao degrau $g(t)$ do SM com atenuador possuindo um FE igual a 35.

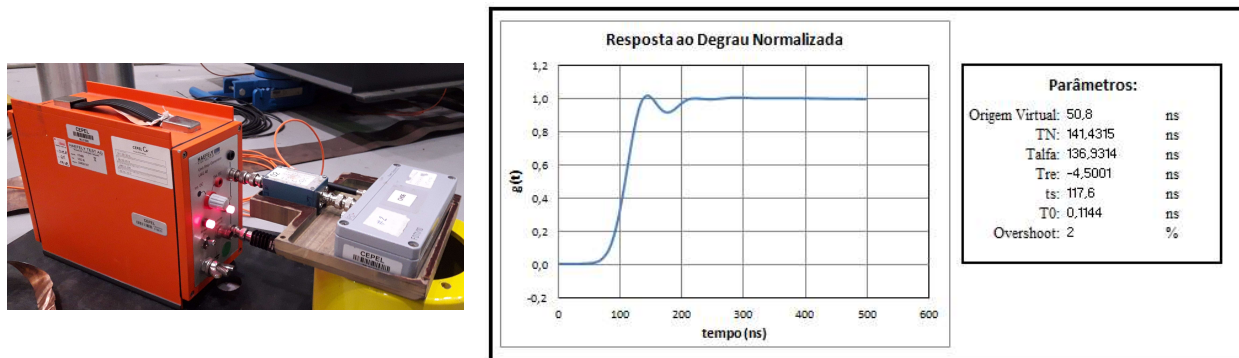


FIGURA 6 – Resposta ao degrau do SM com atenuador com FE igual a 35

Na Figura 7 é apresentado o resultado da verificação de desempenho no domínio da frequência pela resposta $g(f)$ do SM com atenuador possuindo um FE igual a 35.

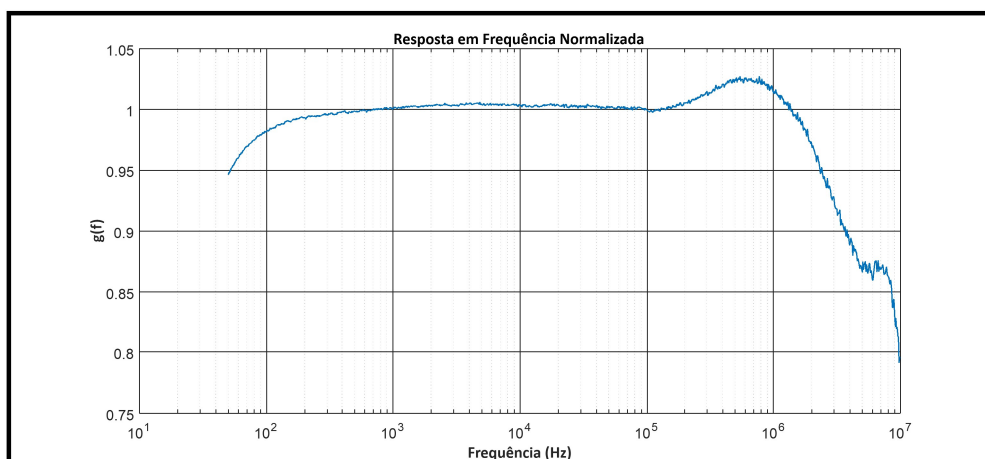


FIGURA 7 – Resposta em frequência do SM com atenuador com FE igual a 35

Na Tabela 1 são apresentados os resultados da avaliação do SM com aplicação de impulsos de corrente e a avaliação do erro relativo da corrente e tempo de frente do impulso (t_1) medidos.

TABELA 1 – Resultados da avaliação de desempenho do SM com impulsos de corrente

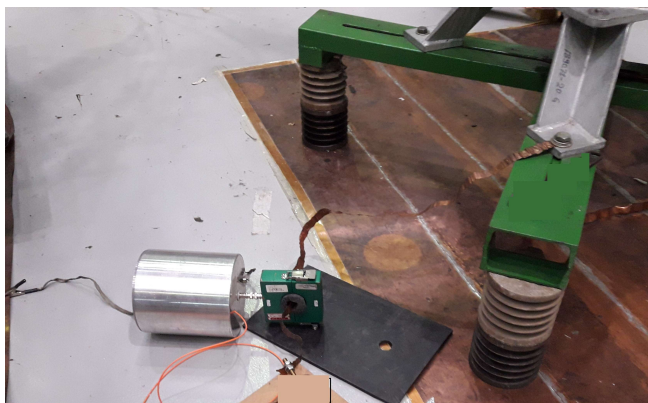
Referência Configuração: 50MS/s; bandwidth Full - 5us/div. - 8bits					Conjunto #1 - HFCT-> At.(35x) -> TX #1-> Fibr#1 -> RX (canal#1) Configuração: 5GS/s; bandwidth Full - 5us/div. - 8bits					Erro Relativo da I med.[%]	Erro Relativo do t1[%]	
Tensão medida [V]	Vlr conv. [A]	t1(10-90%) [us]	Média - t1	Desv. Padrão - t1	Escala TX F.O.	Tensão medida [V]	Vlr conv. [A]	t1(10-90%) [us]	Média - t1	Desv. Padrão - t1	[%]	[%]
0,308	94,12	7,386	7,235	0,199	1V	0,2881	98,82	7,04	7,375	0,298	4,99%	-4,68%
0,312	95,35	7,31				0,2909	99,78	7,61			4,65%	4,10%
0,316	96,57	7,01				0,3013	103,35	7,475			7,02%	6,63%
0,544	166,25	6,37	6,545	0,151		0,515	176,65	6,37	6,628	0,248	6,25%	0,00%
0,544	166,25	6,636				0,5118	175,55	6,65			5,59%	0,21%
0,544	166,25	6,628				0,5176	177,54	6,865			6,79%	3,58%
1,064	325,16	6,048	6,043	0,033		1,002	343,69	6,09	6,063	0,023	5,70%	0,69%
1,064	325,16	6,008				0,9985	342,49	6,05			5,33%	0,70%
1,064	325,16	6,074				0,9863	338,30	6,05			4,04%	-0,40%
0,408	124,68	6,654	6,811	0,152	2V	0,192	131,71	6,863	7,131	0,259	5,64%	3,14%
0,4	122,24	6,82				0,1872	128,42	7,15			5,05%	4,84%
0,404	123,46	6,958				0,191	131,03	7,38			6,13%	6,06%
1,22	372,83	5,956	5,864	0,146		0,5713	391,91	5,97	6,030	0,054	5,12%	0,24%
1,2	366,72	5,94				0,5659	388,21	6,075			5,86%	2,27%
1,22	372,83	5,696				0,5693	390,54	6,045			4,75%	6,13%
2,46	751,78	5,68	5,584	0,083		1,138	780,67	5,74	5,702	0,054	3,84%	1,06%
2,44	745,66	5,532				1,132	776,55	5,725			4,14%	3,49%
2,46	751,78	5,54				1,134	777,92	5,64			3,48%	1,81%

3.2 VERIFICAÇÃO DOS RESULTADOS EM LABORATÓRIO

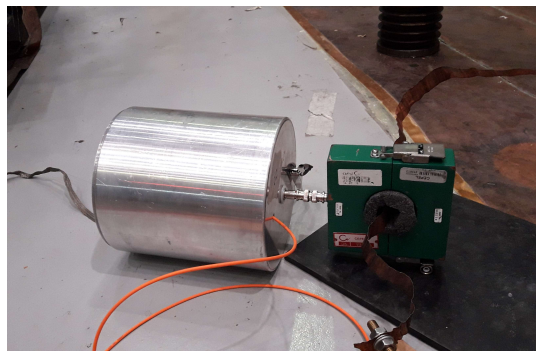
Uma vez realizada a avaliação de desempenho do SM foram comparados os resultados de medições de impulsos de tensões e resultados de sobretensões calculadas a partir das medições de sobrecorrente, que fluem pela cordoalha de aterramento do TC e medida pelo SM, e a impedância do TC. Assim, é possível reconstruir o impulso de tensão considerando a lei de *Ohm* apresentada na Equação 1.

$$V(f) = I(f) * Z(f) \quad (1)$$

As Figuras 8(a) e 8(b) apresentam o local de instalação do HFCT no TC localizado no laboratório e detalhe do posicionamento do HFCT conectado à cordoalha de terra do TC, respectivamente.



(a)



(b)

FIGURA 8 – Local de instalação do HFCT no TC localizado no laboratório e detalhe de posicionamento do HFCT conectado à cordoalha de aterramento

A Figura 9 apresenta as curvas de impedância, medida e calculada de um modelo RLC do TC.

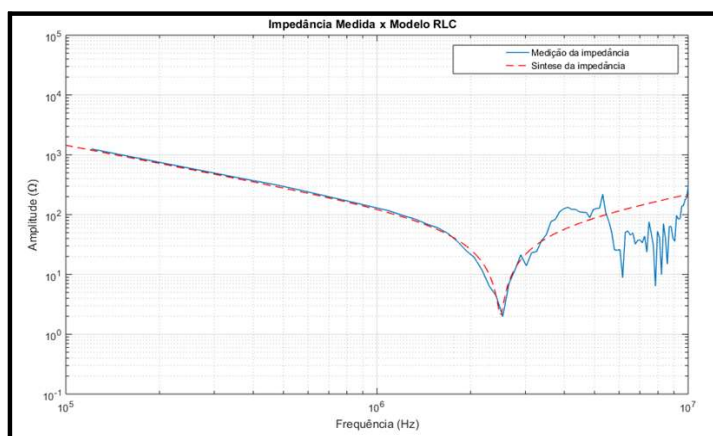
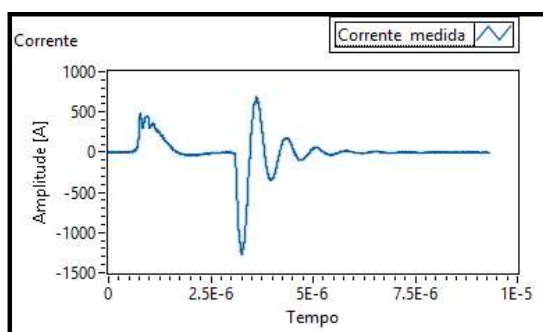
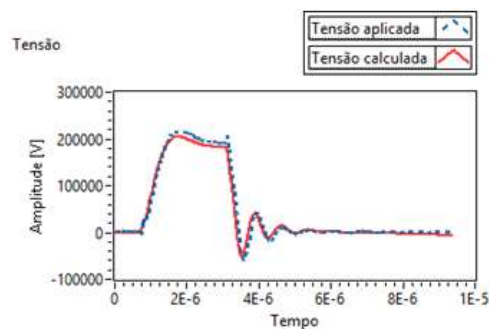


FIGURA 9 – Impedância medida e de sua síntese

As Figuras 10(a) e 10(b) apresentam a corrente que flui pela cordoalha de terra medida pelo SM e a comparação do sinal de tensão medido e o calculado a partir da medição de corrente, respectivamente. [2] e [3]



(a)



(b)

FIGURA 10 – Corrente medida pelo SM e comparação do sinal de tensão medido e o calculado

3.3 VERIFICAÇÃO DOS RESULTADOS EM CAMPO

Para realizar as medições de sobrecorrentes transitórias em uma SE, o SM foi conectado à cordoalha de aterramento dos TCs, similarmente às medições realizadas em laboratório. As medições em campo foram realizadas a fim de avaliar o comportamento do SM sobre condições adversas que são minimizadas em laboratório, como interferências eletromagnéticas, por exemplo. As Figuras 11(a) e 11(b) apresentam o local de

instalação do HFCT nos TCs e detalhe do posicionamento do HFCT conectado à cordoalha de aterramento do TC, respectivamente.

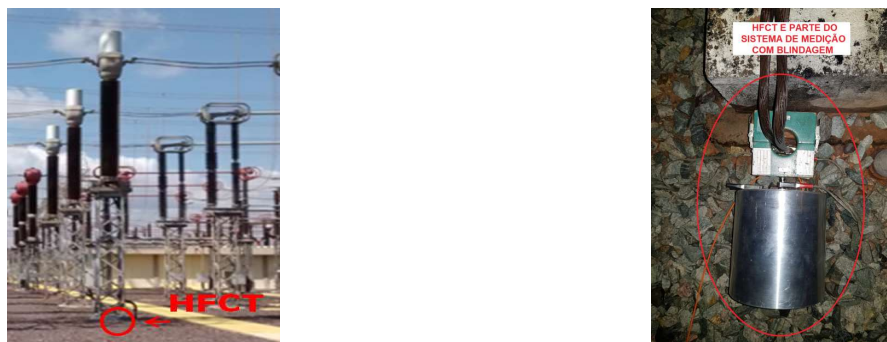


FIGURA 10 – Local de instalação do HFCT na SE e detalhe de posicionamento do HFCT conectado à cordoalha de aterramento

A seguir são apresentados exemplos de sinais de sobrecorrentes medidas durante as manobras de chaveamento, a Figura 11 apresenta uma simplificação do arranjo considerando um único vão para as manobras realizadas e medições de sobrecorrente transitórias nos TCs instalados. [4]



FIGURA 11 – Diagrama simplificado dos equipamentos monitorados

Devido às semelhanças dos sinais medidos, selecionou-se um exemplo de abertura e um exemplo de fechamento para demonstração dos resultados. As Figuras 12 e 13 apresentam os sinais de sobrecorrentes medidas durante a manobra de fechamento do SC2 com o SC1 aberto para a Fase A e os valores dos picos de sobrecorrente medidos, máximo e mínimo, com a tensão calculada destes sinais, respectivamente.

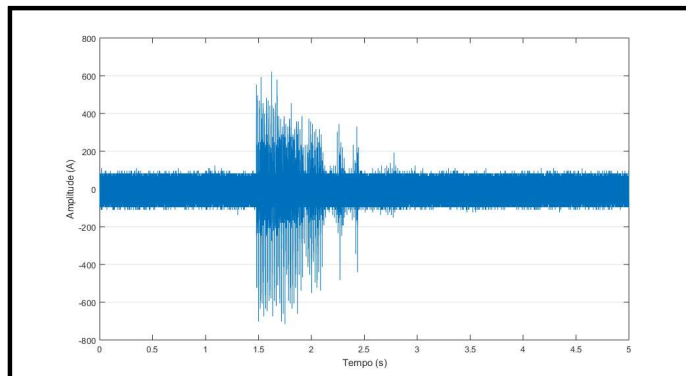


FIGURA 12 – Fechamento do SC2 com o SC1 aberto para a Fase A

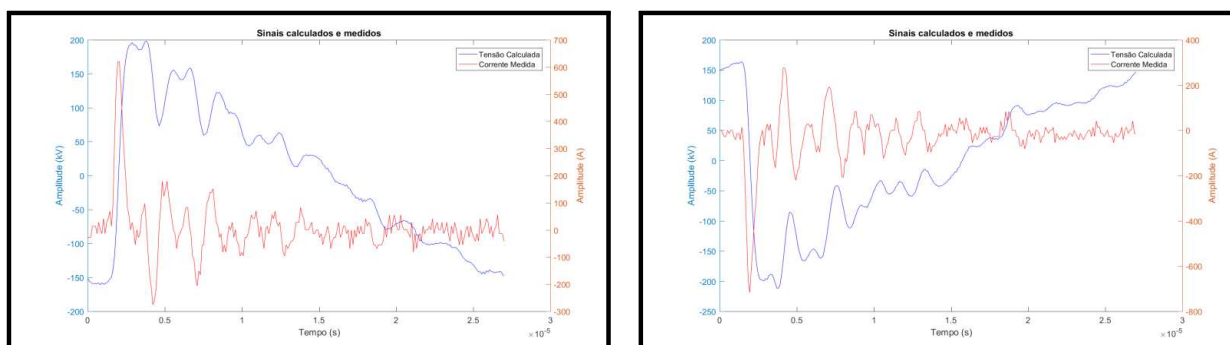


FIGURA 13 – Fechamento do SC2 com o SC1 aberto para a Fase A – Corrente máxima e mínima medida e tensão calculada

As Figuras 14 e 15 apresentam os sinais de sobrecorrentes medidas durante a manobra de abertura do SC2 com o SC1 aberto para a Fase A e os valores dos picos de sobrecorrente medidos, máximo e mínimo, com a tensão calculada destes sinais, respectivamente.

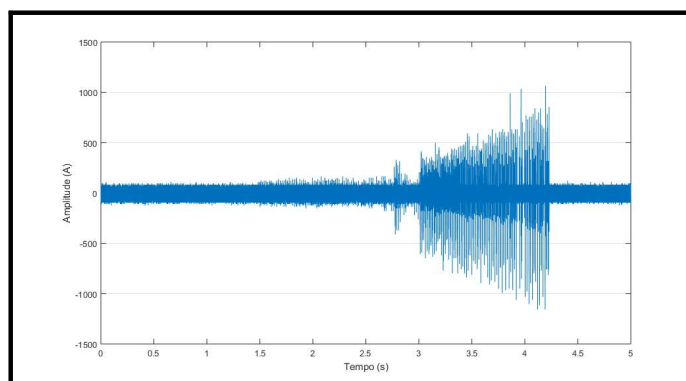


FIGURA 14 – Abertura do SC2 com o SC1 aberto para a Fase A

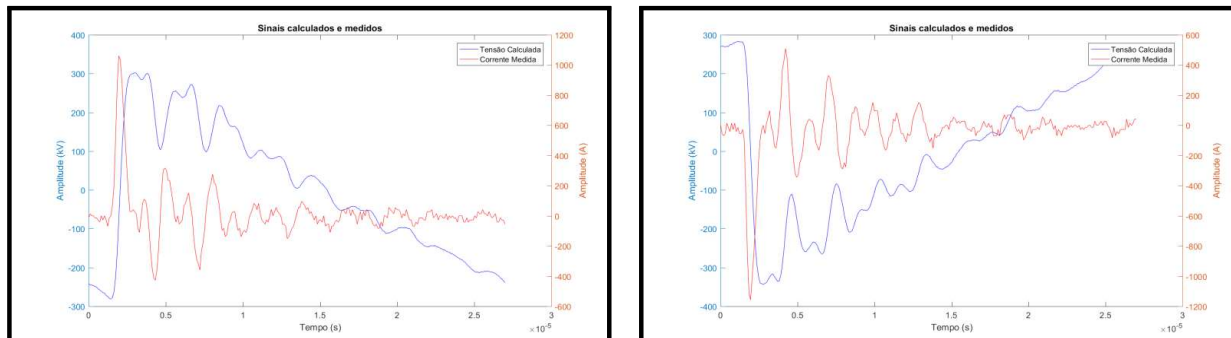


FIGURA 15 – Abertura do SC2 com o SC1 aberto para a Fase A – Corrente máxima e mínima medida e tensão calculada

4.0 - ANÁLISE DE RESULTADOS E OBSERVAÇÕES

Avaliando os resultados de desempenho do SM, pode ser destacado:

- A resposta em frequência se mantém plana até $\approx 1,8$ MHz, considerando um erro admissível de $\pm 2\%$ para o SM;
- Ao observar a resposta em frequência considerando ≈ 3 MHz o erro se encontra em 8%, em ≈ 5 MHz o erro se apresenta em 14% e em ≈ 10 MHz o erro é de 20%;
- O ajuste da $g(t)$ do SM apresenta um tempo de estabilização em torno de 120 ns, que representa um limite na resposta em frequência de $\approx 8,5$ MHz;
- O desvio do FE medido para todos os casos foi menor que 8%.

Com estes resultados é possível avaliar quantitativamente e qualitativamente as solicitações impostas aos TCs por meio da medição de sobrecorrente transitória que percorre sua cordoalha de aterramento. Para isto, é necessário realizar ensaios de caracterização de impedância dos TCs, os ajustes no SM e correções do FE a fim de adequá-los a medição.

Entretanto, o método de medição desenvolvido em laboratório utiliza um único meio de conexão entre os terminais de alta tensão do TC e o potencial nulo (terra). Desta forma, é esperado que esta mesma condição se encontre na SE. Porém, em algumas das medições realizadas este fato não foi observado, pois a estrutura funcionou como um condutor de aterramento (verificado com um multímetro, sendo medido valor próximo a 0Ω). [2] Uma alternativa a este problema seria conhecer o comportamento destes caminhos no domínio da frequência e posteriormente realizar a correção. A Figura 16 ilustra possíveis caminhos paralelos para a corrente.

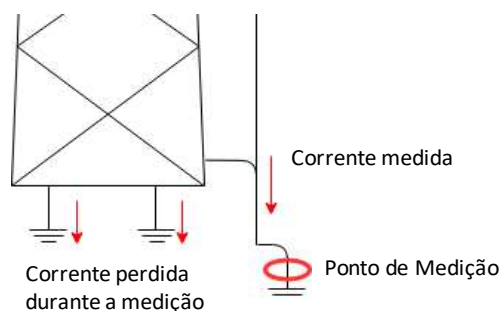


FIGURA 16 - Divisão da corrente durante a medição

5.0 - CONCLUSÕES E COMENTÁRIOS

As investigações e os ensaios realizados com a amostra do TC e SM em conjunto com a análise dos resultados, possibilitaram as seguintes afirmações em relação ao desempenho dinâmico do conjunto TC/SM.

- Comprova a utilização da cordoalha de aterramento do TC para medição de sobrecorrente transitória;
- Possibilidade de quantificar os parâmetros das manobras normalizadas e não normalizadas a que estão submetidos os equipamentos;
- Possibilita um ajuste nos modelos, simulações e estudos para coordenação de isolamento.

Das investigações também foram observadas oportunidades de melhorias tanto qualitativas quanto quantitativas que estão descritas abaixo.

- Avaliar e melhorar a blindagem contra interferências;
- Aumentar a blindagem dos cabos coaxiais de medição;
- Avaliar alternativas do problema encontrado nas SEs referente ao conhecimento do comportamento de possíveis caminhos que a sobrecorrente percorre, avalia-los no domínio da frequência e posteriormente realizar possíveis correções;
- Avaliar a interação com outros SM e avaliação de novos sensores.

6.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] DA Silva, M.T.F., "PROJETO & DESENVOLVIMENTO DE UM PADRÃO PARA ALTA TENSÃO EM CORRENTE CONTÍNUA NA FAIXA DE 1 KV A 50 KV", Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Metrologia da Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro – PUC-Rio. Rio de Janeiro, RJ. Março de 2011.
- [2] MARTINS, H. J. A., SOUZA, D. S., DELGADO, R. S., MENEZES, R. C., "MEDIÇÃO DE TRANSITÓRIOS DE TENSÃO EM TRANSFORMADORES DE CORRENTE, CLASSE 550 KV, GERADOS POR MANOBRAS DE SECCIONADORES", Relatório Técnico CEPEL, Rio de Janeiro 2017.
- [3] DELGADO, R. dos S., "INTERAÇÃO ENTRE TRANSFORMADORES DE CORRENTE DE ALTA TENSÃO E MANOBRAS DO SISTEMA", Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Rio de Janeiro – UFRJ. Rio de Janeiro, RJ. Setembro de 2018.
- [4] VASQUES, C. M. R., SOUZA, D. S. de, AMORIM Jr., H. P., DELGADO, R. dos S., DOS SANTOS, L. T. B., SANTOS, L. E., REMA, G. S. "MEDIÇÃO DE CORRENTES TRANSITÓRIAS EM TRANSFORMADORES DE CORRENTE, CLASSE 550 KV, GERADOS POR MANOBRAS DE SECCIONADORES.", Relatório Técnico CEPEL, Rio de Janeiro 2019.

7.0 - DADOS BIOGRÁFICOS



Carlos Magno Rodrigues Vasques – Graduado em Engenharia Eletrônica e Computação pela Universidade Federal do Rio de Janeiro – UFRJ (2004), especialista em Automação Industrial pelo SENAI-RJ (2009) e mestre em Engenharia Elétrica na área de Processamento de Sinais e Inteligência Computacional pela COPPE/UFRJ (2011). É pesquisador no CEPEL, participa de pesquisas voltadas à interação entre transitórios eletromagnéticos e equipamentos de alta tensão, além de ensaios e pesquisas para monitoramento, avaliação e diagnóstico de equipamentos dando subsídio às áreas de manutenção e pesquisas das empresas do setor elétrico. Autor de trabalhos, nacionais e internacionais, participando ativamente de grupos de trabalho do Cigré.