



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

ANÁLISE DAS SOLICITAÇÕES IMPOSTAS POR AIS/GIS E LINHAS SUBTERRÂNEAS SOBRE OS TRANSFORMADORES DE POTÊNCIA

GRACITA BATISTA ROSAS(1); PABLO MOURENTE MIGUEL(2); MARCELO MENDONÇA GONÇALVES(3); VENILTON RODRIGUES DE OLIVEIRA(3); HELIO PESSOA DE OLIVEIRA JR(4); MIGUEL ARMINDO SALDANHA MIKILITA(5); JEFERSON SHIMOMURA(6); COPEL(1);Tgdelta (2);JORDÃO ENG.(3);ONS(4);COPEL(5);COPEL(6);

RESUMO

Neste informe técnico são analisadas as solicitações dielétricas sobre os transformadores de potência, da nova subestação 230 kV Curitiba Centro, impostas pelo efeito combinado dessa nova subestação isolada a gás e da nova linha subterrânea 230 kV Curitiba Centro – Uberaba, em circuito duplo subterrâneo. As solicitações analisadas consideram as sobretensões de impulso e as sobretensões muito rápidas. Para efeito de comparação são analisadas as solicitações que seriam observadas em uma subestação convencional suprida por linhas aéreas. A análise foi realizada para a etapa de projeto básico do novo empreendimento de transmissão.

PALAVRAS-CHAVE

Transformadores, Linha Subterrânea, Subestações isoladas a gás, Sobretensões muito rápidas

1.0 - INTRODUÇÃO

Os transformadores de potência são equipamentos cuja reparação é demorada. A indisponibilidade de um transformador causa grande impacto na operação de um sistema elétrico. As solicitações que mais causam danos a transformadores são aquelas que atingem o isolamento, ou seja, as solicitações dielétricas. As solicitações impostas pelas sobretensões muito rápidas (VFTO), tem causado faltas recorrentes em transformadores e gerado restrições operacionais em algumas subestações.

Atualmente, a utilização de linhas de transmissão subterrâneas de alta e extra alta tensão está se tornando mais comum. Essas linhas apresentam uma grande capacitância e podem provocar ressonâncias, assim o seu efeito nas solicitações dielétricas sobre os transformadores deve ser analisado.

Neste artigo são analisadas as solicitações dielétricas sobre os transformadores de potência impostas pelo efeito combinado de uma subestação isolada a gás (GIS) e linhas subterrâneas. Para efeito de comparação são analisadas as solicitações que seriam observadas em uma subestação convencional suprida por linhas aéreas.

As sobretensões de impulso e VFTO são avaliadas sobre os transformadores da nova SE Curitiba Centro, isolada a gás (GIS) na tensão de 230 kV. Nessa subestação estão conectados dois transformadores de potência de 150 MVA. A SE Curitiba Centro tem a particularidade de ser conectada ao sistema interligado por uma linha subterrânea em circuito duplo na tensão de 230 kV, com aproximadamente 8 quilômetros de comprimento. São analisadas as solicitações sobre o isolamento dos transformadores introduzidas pelo comportamento do conjunto GIS e linha subterrânea e traçado um paralelo com as solicitações observadas para:

- o A mesma GIS alimentada a partir de linhas aéreas;
- o Uma subestação isolada a ar (AIS) suprida por linhas aéreas.

A análise se inicia pela determinação das solicitações dielétricas impostas por subestações convencionais isoladas a ar (AIS). A seguir se analisam as solicitações impostas por subestações isoladas a gás (GIS). Se analisa a diferença entre as solicitações impostas pelas AIS e GIS.

Para as sobretensões de impulso se verificou que uma GIS suprida por linhas aéreas apresenta sobretensões de impulso nos transformadores de potência pouco acima de uma subestação isolada a ar (AIS). Quando a GIS é suprida por linhas subterrâneas, se observa uma redução na amplitude das sobretensões que, no entanto, passam a apresentar uma maior duração. Isso se deve ao efeito da capacitância dos cabos da linha subterrânea.

Sobre as VFTO, se observa que a amplitude dessas sobretensões depende do valor das capacitâncias, em especial dos capacitores de gradação. Quando os disjuntores da GIS não dispõem de capacitores de gradação, a amplitude das VFTO é mais baixa. O espectro de frequência das VFTO depende essencialmente da localização da chave seccionadora sendo manobrada.

Ainda sobre as VFTO, em uma GIS toda e cada manobra da origem a um trem de pulsos de VFTO contendo dezenas ou mesmo centenas de pulsos. Como em uma GIS a atenuação das ondas trafegantes é baixa, devido ao retorno pelo involucro, os pulsos de VFTO acabam por impactar todos os transformadores conectados à GIS, mesmo os que não estão sendo manobrados e os que estão com o disjuntor aberto. O efeito das VFTO é cumulativo, assemelhando-se a um envelhecimento acelerado devido à maior dissipação de calor provocado pelas componentes de alta frequência nos pontos de concentração de tensão.

Em uma AIS o retorno pelo solo faz com que os pulsos gerados sejam atenuados e a amplitude se reduz. Além disso, o espectro de frequência mostra componentes na faixa de dezenas de quilohertz e as sobretensões geradas não podem ser qualificadas como VFTO.

2.0 - MODELAGEM DE SUBESTAÇÕES E LINHAS DE TRANSMISSÃO SUBTERRÂNEA

Inicialmente serão verificadas as solicitações dielétricas sobre os transformadores que se observam quando esse é conectado a uma AIS suprida por linhas aéreas. Posteriormente se analisa o caso em que o transformador é conectado a uma GIS suprida por linhas aéreas. Finalmente se analisa o efeito do conjunto GIS e linhas subterrâneas sobre as solicitações dielétricas impostas ao transformador. Conforme ilustrado na Figura 1, geralmente as solicitações dielétricas (1) são classificadas da seguinte maneira:

- Baixas frequências
 - Frequência industrial – para este caso os barramentos podem ser ignorados ou, quando muito, representados por elementos concentrados, geralmente apenas as capacitâncias;
 - Sobretensões temporárias – de 10 a 500 Hz, com duração entre 20 ms e 1 hora, a representação das indutâncias e capacitâncias se faz necessária,
- Frente lenta – este tipo de sobretensão decorre de manobras e apresenta tempo de frente entre 20 μ s e 5000 μ s,
- Frente rápida – um exemplo desse tipo de sobretensão são as sobretensões devidas a descargas atmosféricas, o tempo de frente varia de 0,1 μ s a 20 μ s,
- Frente muito rápida – este tipo de sobretensão apresenta tempo de frente menor que 100 ns, sendo usualmente produzido por manobras em GIS (sobretensões muito rápidas – VFTO), dificilmente será observada em AIS.

Classe	Baixa frequência		Transitório		
	Contínua	Temporária	Frente Lenta	Frente Rápida	Frente Muito Rápida
Formas de tensão ou sobretensão					
Faixa de formas de tensão ou sobretensão	$f=50 \text{ Hz ou } 60 \text{ Hz}$ $T_t \geq 3600 \text{ s}$	$10 \text{ Hz} < f < 500 \text{ Hz}$ $0,02 \text{ s} \leq T_t \leq 3600 \text{ s}$	$20 \mu\text{s} < T_p \leq 5000 \mu\text{s}$ $T_2 \leq 20 \text{ ms}$	$0,1 \mu\text{s} < T_1 \leq 20 \mu\text{s}$ $T_2 \leq 300 \mu\text{s}$	$T_f \leq 100 \text{ ns}$ $0,3 \text{ MHz} < f_1 < 100 \text{ MHz}$ $30 \text{ kHz} < f_2 < 300 \text{ kHz}$

FIGURA 1 – Definição das sobretensões segundo IEC-60071-1 (1)

2.1 Subestação isolada a ar (AIS) com linhas de transmissão aéreas

Uma AIS é formada por barramentos que funcionam como linhas aéreas extremamente curtas. O meio isolante é o ar, a impedância característica e a velocidade de propagação (2) são estimados por:

$$L = \frac{\mu_0}{2\pi} \ln\left(\frac{4h}{d}\right) \quad C = \frac{2\pi\epsilon_0}{\ln\left(\frac{4h}{d}\right)} \quad Z_0(\omega) = \sqrt{\frac{R+j\omega L}{G+j\omega C}} \quad |Z_0| \approx \sqrt{\frac{\frac{\mu_0}{2\pi} \ln\left(\frac{4h}{d}\right)}{\frac{2\pi\epsilon_0}{\ln\left(\frac{4h}{d}\right)}}} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}} \ln\left(\frac{4h}{d}\right) \quad (1)$$

$$\gamma = \frac{1}{\sqrt{(R+j\omega L)(G+j\omega C)}} = \alpha + j\beta \quad v \approx \frac{\beta}{\omega} = \frac{1}{\sqrt{\frac{\mu_0}{2\pi} \ln\left(\frac{4h}{d}\right) \frac{2\pi\epsilon_0}{\ln\left(\frac{4h}{d}\right)}}} = \frac{1}{\sqrt{\mu_0\epsilon_0}} \quad \tau = \frac{l}{v} \quad \Delta t \leq \frac{1}{4}\tau$$

onde h – altura do condutor, d – diâmetro dos condutores do barramento, α – coeficiente de atenuação, γ - constante de propagação, τ – tempo de trânsito, Δt – intervalo de integração.

A Figura 2 mostra o modelo da AIS usado nas simulações para determinar as sobretensões que atingem os transformadores. Em uma subestação de 230 kV a grande maioria dos trechos de barramentos nos vãos apresentam comprimento inferior a 10 m, poderiam ser simulados por elementos concentrados. No entanto, optou-se por usar uma representação a parâmetros distribuídos para que possa ser usado o mesmo modelo para a simulação de frentes com onda rápida e muito rápida.

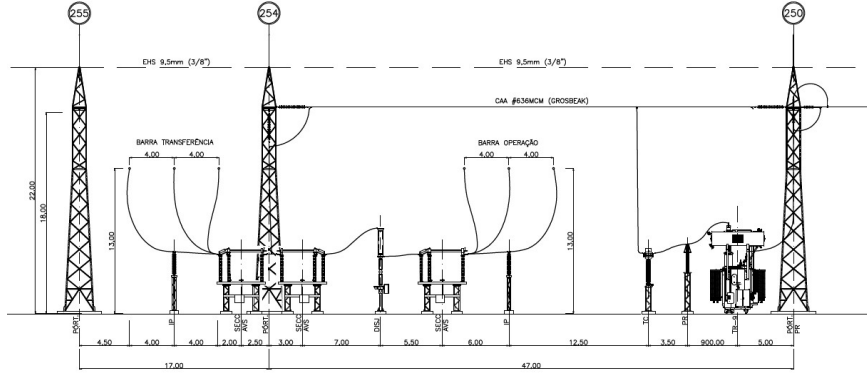


FIGURA 2 – Vão do transformador – AIS 230 kV

Um ponto a ressaltar, que muitas vezes é esquecido, é que o aterramento do terminal neutro do transformador é feito por um cabo duplo que vai da bucha no topo do tanque até a malha de terra. Como a altura de um transformador de potência é em torno de 5 m, a impedância desse cabo de aterramento deve ser considerada, sendo representada por uma indutância constante. Também os para-raios são aterrados por meio de cabos (duplos) e a indutância desses cabos deve ser simulada por uma indutância concentrada (3).

2.2 Subestação isolada a gás (GIS) com linhas de transmissão aéreas

Uma GIS é formada por barramentos dentro de um invólucro metálico, funcionando como linhas coaxiais extremamente curtas. O meio isolante é o SF₆, a impedância característica e a velocidade de propagação (2) são estimados por:

$$L = \frac{\mu_0}{2\pi} \ln\left(\frac{D}{d}\right) \quad C = \frac{2\pi\epsilon_0\epsilon_R}{\ln\left(\frac{D}{d}\right)} \quad Z_0(\omega) = \sqrt{\frac{R+j\omega L}{G+j\omega C}} \quad |Z_0| \approx \sqrt{\frac{\frac{\mu_0}{2\pi} \ln\left(\frac{D}{d}\right)}{\frac{2\pi\epsilon_0\epsilon_R}{\ln\left(\frac{D}{d}\right)}}} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0\epsilon_R}} \ln\left(\frac{D}{d}\right) \quad (2)$$

$$\gamma = \frac{1}{\sqrt{(R+j\omega L)(G+j\omega C)}} = \alpha + j\beta \quad v \approx \frac{\beta}{\omega} = \frac{1}{\sqrt{\frac{\mu_0}{2\pi} \ln\left(\frac{D}{d}\right) \frac{2\pi\epsilon_0\epsilon_R}{\ln\left(\frac{D}{d}\right)}}} = \frac{1}{\sqrt{\mu_0\epsilon_0\epsilon_R}} \quad \tau = \frac{l}{v} \quad \Delta t \leq \frac{1}{4}\tau$$

onde D – diâmetro interno do involucro, d – diâmetro externo dos condutores, α – coeficiente de atenuação, γ - constante de propagação, τ – tempo de trânsito, Δt – intervalo de integração.

Como a velocidade de propagação na GIS, apesar de mais baixa, é da mesma ordem de grandeza da observada na AIS, os mesmos critérios se aplicam para a representação dos elementos na simulação.

A Figura 3 mostra o arranjo de uma GIS de 230 kV usada nas simulações. A GIS é caracterizada por apresentar um arranjo de cabos envolvidos por um tubo (coaxial nos casos de fases segregadas). Esse tipo de arranjo apresentaria um fator de atenuação desprezível, posto que a $\text{tg}\delta$ do SF₆ é da ordem de 10⁻⁷. Mas a GIS também dispõe de isoladores de suporte. Esses isoladores apresentam uma capacitância concentrada e apresentam um fator de dissipação devido à carga associada à resina adicionada para aumentar a suportabilidade mecânica dos isoladores. Esses isoladores de suporte acabam por se comportar como pontos de descontinuidade adicionais, ajudando a reduzir as sobretensões, mas produzindo um efeito adicional que será analisado ao se estudar as sobretensões com frente muito rápida (VFTO).

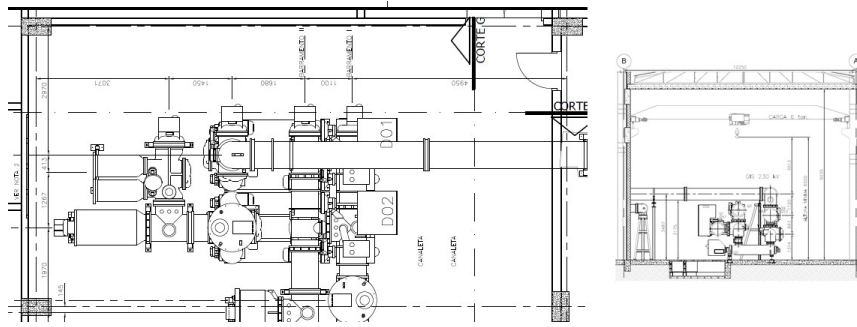


FIGURA 3 – Vão do transformador – GIS 230 kV

Também na simulação da GIS será usada a modelagem dos trechos de barramento com parâmetros distribuídos. Dessa forma o mesmo modelo poderá ser usado nas simulações de ondas com frente de onda rápida e muito rápida.

Para as simulações envolvendo o sistema modelado para avaliação das sobretensões nos transformadores da SE 230 kV Curitiba Centro, tem-se que para sobretensões com:

- Frente lenta - comprimentos inferiores a 600 m podem ser representados por elementos concentrados,
- Frente rápida – comprimentos inferiores a 10 m podem ser representados por elementos concentrados,
- Frente muito rápida – comprimentos inferiores a 1 m podem ser representados por elementos concentrados.

2.3 Descrição da linha subterrânea

A LT 230 kV Curitiba Centro – Uberaba, possui dois circuitos trifásicos subterrâneos de aproximadamente 8 quilômetros de extensão. Cada circuito da linha é transposto de forma individual e adotada uma formação vertical plana, exceto nos pontos de travessia por perfuração direcional, onde é usada uma formação trifólio. A transposição é realizada nos condutores e não nas blindagens. Cada circuito passa por nove transposições, ou seja, 3 ciclos de transposição completos em cada circuito. O aterramento da linha é feito por cross-bonding, de forma a reduzir a tensão induzida nas blindagens dos cabos. As blindagens são aterradas em cada extremidade da linha. A cada ciclo completo de transposição as blindagens das três fases são conectadas e aterradas localmente. Nos pontos intermediários de transposição, as blindagens são mantidas isoladas e conectadas à terra por meio de um limitador de surtos. A Figura 4 ilustra a disposição dos cabos e o diagrama de aterramento da blindagem com cross-bonding.

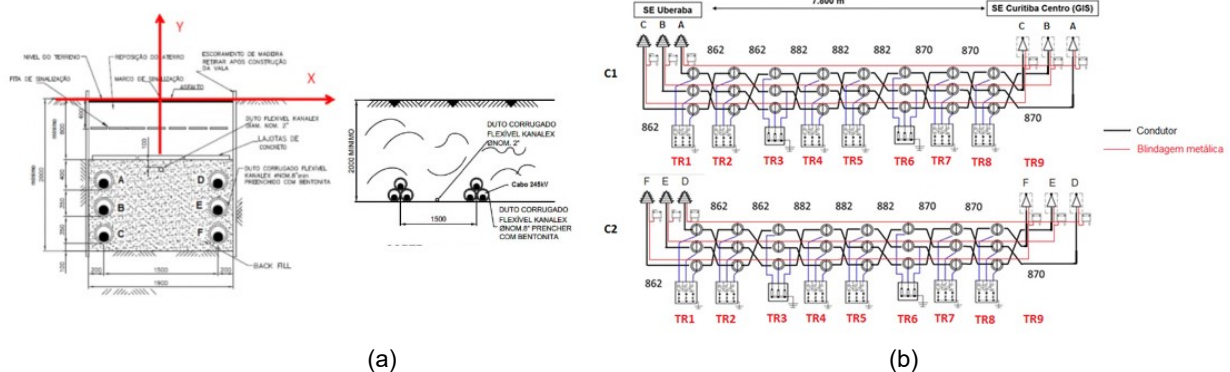


FIGURA 4 – (a) Disposição dos Cabos (b) Diagrama do aterramento da blindagem com cross-bonding

A linha em questão, sendo formada por dois circuitos trifásicos, possui 6 cabos, o que corresponde a 12 modos de propagação. Os modos de 1 a 6 são os modos de retorno pelo solo, ou seja, das blindagens para o solo, e apresentam uma maior atenuação e baixa velocidade de propagação. Os modos de 7 a 12 são os modos de propagação de transitórios eletromagnéticos entre os condutores e a blindagens, apresentando menor atenuação e velocidade de propagação mais elevada.

2.4 Reflexões na entrada de AIS e GIS

Em uma AIS apesar de a impedância característica do barramento ser diferente da observada nas linhas aéreas, essa diferença não é tão grande, posto que a forma construtiva é a mesma. Já quando da entrada de uma linha aérea em uma GIS, a diferença entre as impedâncias de surto é muito acentuada. Os coeficientes de reflexão e

transmissão (ou refração) (2) são dados respectivamente, por:

$$K_R = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1} \quad K_T = \frac{2Z_2}{Z_2 + Z_1} \quad (3)$$

onde Z_1 – impedância no meio de origem da onda, Z_2 – Impedância no meio de destino.

Usando valores típicos para as impedâncias características, conforme apresentado na Tabela 1, pode-se ilustrar como a amplitude das ondas de tensão se comporta ao entrar em cada um dos tipos de subestação.

TABELA 1 – Impedâncias Características

localização	AIS	GIS (linhas aéreas)	GIS (linhas subterrâneas)
linha	$Z_l = 450\Omega$	$Z_l = 450\Omega$	$Z_c = 35\Omega$
barra	$Z_b = 250\Omega$	$Z_{bg} = 60\Omega$	$Z_{bg} = 60\Omega$

Quando o surto incide da linha para a subestação, surge uma onda refletida e uma onda transmitida. A Tabela 2 a seguir apresenta reflexões e transmissões nas fronteiras entre as impedâncias características da Tabela 1. No caso de uma linha aérea entrando em uma AIS, a amplitude do surto que se propaga para o barramento sofre uma redução para cerca de 71 % do valor original.

No caso de uma linha aérea entrando em uma GIS o surto que se propaga na barra se reduz para cerca de 23 % ao entrar na GIS. Se o surto vier a partir de uma linha subterrânea, o surto sofre um aumento de amplitude ao passar a se propagar no barramento.

TABELA 2 – Reflexões e Transmissões

Reflexão	AIS	GIS (linhas aéreas)	GIS (linhas subterrâneas)
Linha -> Barra	$K_r = \frac{Z_b - Z_l}{Z_b + Z_l} = -0,2857$	$K_r = \frac{Z_{bg} - Z_l}{Z_{bg} + Z_l} = -0,7647$	$K_r = \frac{Z_{bg} - Z_c}{Z_{bg} + Z_c} = 0,2632$
Barra -> Linha	$K_r = \frac{Z_l - Z_b}{Z_b + Z_l} = 0,2857$	$K_r = \frac{Z_l - Z_{bg}}{Z_{bg} + Z_l} = 0,7647$	$K_r = \frac{Z_c - Z_{bg}}{Z_{bg} + Z_c} = -0,2632$
Transmissão	AIS	GIS (linhas aéreas)	GIS (linhas subterrâneas)
Linha -> Barra	$K_T = \frac{2 Z_b}{Z_b + Z_l} = 0,7143$	$K_T = \frac{2 Z_{bg}}{Z_{bg} + Z_l} = 0,2353$	$K_T = \frac{2 Z_{bg}}{Z_{bg} + Z_c} = 1,263$
Barra -> Linha	$K_T = \frac{2 Z_l}{Z_b + Z_l} = 1,286$	$K_T = \frac{2 Z_l}{Z_{bg} + Z_l} = 1,765$	$K_T = \frac{2 Z_c}{Z_{bg} + Z_c} = 0,7368$

Quando o surto se propaga da barra para a linha ocorre uma situação inversa. Deve ser notado que quando o surto se propaga da GIS para uma linha aérea ocorre um aumento de 76,5 % na amplitude da componente transmitida.

Existe um comportamento muito diferente na propagação dos surtos para o caso da GIS quando conectada a linhas aéreas ou linhas subterrâneas. Dessa forma, se faz necessário como isso impacta as solicitações sobre os transformadores.

3.0 - SOLICITAÇÕES DIELÉTRICAS SOBRE O TRANSFORMADOR

O objetivo deste artigo é limitado às solicitações sobre os transformadores de potência. Assim foram montados circuitos de simulação dos diversos arranjos de subestação (AIS e GIS), com o objetivo de obter as sobretensões sobre o transformador.

3.1 Sobretensões de impulso

Para as sobretensões de impulso atmosférico, que correspondem a sobretensões com frente de onda rápida, o passo de integração deverá ser de 10 ns. Esse passo de integração deverá ser menor do que $\frac{1}{4}$ do tempo de trânsito em qualquer elemento representado por parâmetros distribuídos. Um trecho de barramento com 10 m de comprimento apresenta um tempo de trânsito de 40 ns, quando isolado a ar. Como o tempo de subida para uma sobretensão desse tipo varia de 100 ns a 20 μ s, o passo de integração escolhido permite pelo menos 10 passos sejam obtidos no ponto de maior taxa de variação esperada na simulação. Como raramente se encontram sobretensões tão rápidas para este tipo de estudo, a escolha do passo de integração de 10 ns se mostra bastante conservadora.

Numa GIS a velocidade de propagação é ligeiramente mais baixa do que numa AIS. Assim, o limite de 10 m para a representação por parâmetros distribuídos atenderá automaticamente ao critério de que o passo de integração deverá ser menor do que $\frac{1}{4}$ do tempo de trânsito em qualquer elemento representado por parâmetros distribuídos. Os para-raios usados apresentam 120 kV e foram modelados considerando a variação da tensão residual em função da taxa de crescimento da frente de onda da tensão, ou seja, variação de parâmetros com a frequência, conforme descrito em (3).

O NBI dos enrolamentos de 230 kV é de 950 kV, de forma que a máxima sobretensão frente a impulso admissível corresponde a 85 % do NBI, ou seja, 807,5 kV. Os resultados encontrados são apresentados na Tabela 3. Foram

considerados os seguintes valores para os impactos de descargas atmosféricas:

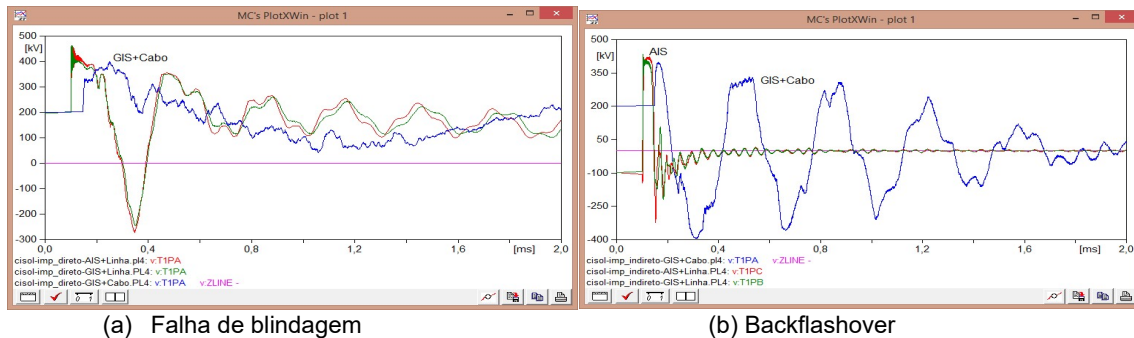
- Falha de blindagem – 9500 A – $0,1 \times 50 \mu\text{s}$ – impacto no vão entre o pórtico e a primeira torre da linha, amplitude de corrente determinada para a silhueta da torre padrão 05 da COPEL, usando o modelo eletrogeométrico;
- Backflashover – 200 kA – $\frac{1}{2} \times 50 \mu\text{s}$ – Impacto no cabo guarda no vão entre o pórtico e a primeira torre da linha

TABELA 3 – Sobretensões de impulso nos terminais primários do transformador

Caso	AIS + linha aérea	GIS + linha aérea	GIS + linha subterrânea
	(kV / % NBI)	(kV / % NBI)	(kV / % NBI)
Falha de blindagem	456 kV / 48,0 %	463 kV / 48,7 %	399 kV / 42,0 %
Backflashover	424 kV / 44,6 %	434 kV / 45,7 %	398 kV / 41,9 %

A Figura 5 - (a) mostra a sobretensão na fase mais solicitada para uma falha de blindagem. Para o caso em que a entrada é feita por meio de uma linha aérea, há pouca diferença entre as sobretensões obtidas no transformador. No caso em que a entrada é feita na GIS por meio de uma linha subterrânea, a sobretensão se reduz em relação aos outros dois casos e se observa que existe um retardo entre o instante do impacto e a chegada da sobretensão ao transformador. Esse retardo corresponde ao tempo de trânsito na linha subterrânea.

A Figura 5 - (b) mostra as sobretensões obtidas para um backflashover ocorrendo no vão entre o pórtico e a primeira torre. Os casos de AIS e GIS com entrada por meio de linha aérea apresentam pouca diferença na sobretensão alcançada. O caso de GIS com entrada por meio de linha subterrânea mostra o já esperado retardo na chegada da sobretensão e também um comportamento oscilatório na sobretensão. Ou seja, a sobretensão devida a um backflashover no caso de uma linha subterrânea apresenta uma maior duração e vários picos.



(a) Falha de blindagem

(b) Backflashover

FIGURA 5 – Comparação das sobretensões para impactos na entrada da linha

3.2 Sobretensões Muito Rápidas - VFTO

Para as VFTO, que correspondem a sobretensões com frente de onda muito rápida, o passo de integração deverá ser de 1 ns. Esse passo de integração deverá ser menor do que $\frac{1}{4}$ do tempo de trânsito em qualquer elemento representado por parâmetros distribuídos. Um trecho de barramento com 0,9 m de comprimento apresenta um tempo de trânsito de 4,3 ns.

3.2.1 Produção de VFTO em uma GIS

Convém que se descreva em que situação são formadas as VFTO. Com o disjuntor na posição aberta, forma-se um divisor capacitivo entre a capacitância inerente, e de gradação caso exista, e a capacitância do barramento a jusante do disjuntor. Com isso aparece uma tensão no trecho de barramento sendo desligado. Quando a seccionadora é aberta, a capacitância a jusante do disjuntor se reduz, posto que passa a ser somente a capacitância do trecho entre o disjuntor e a seccionadora, que é extremamente curto. A tensão nesse trecho curto, fica elevada e se forma um arco sobre a seccionadora em manobra. Esses reacendimentos de arco é que formam os pulsos de VFTO e continuam até que a distância entre os contatos da chave seccionadora seja suficiente para suportar a tensão.

Como a GIS na SE Curitiba Centro é de 230 kV, os disjuntores apresentam uma única câmara de interrupção e não são empregados os capacitores de gradação, a capacitância entre os contatos do disjuntor será apenas a capacitância inerente que é da ordem de 20 pF. Dessa forma, não ocorre a formação de pulsos de VFTO com tensão apreciável, conforme verificado no oscilograma mostrado na Figura 6.

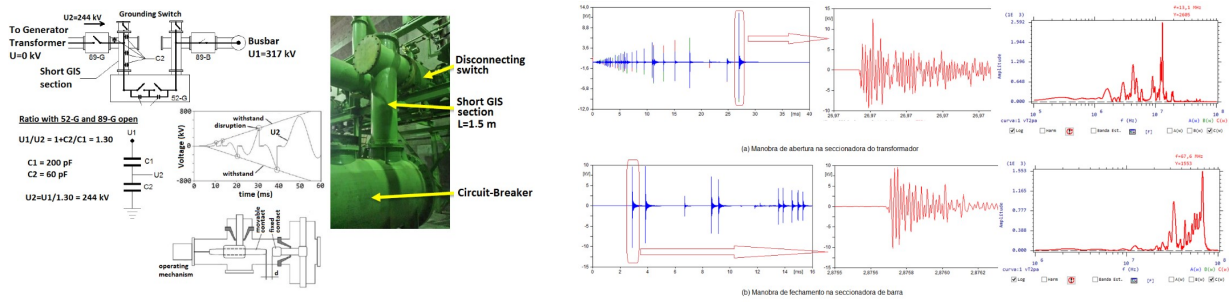


FIGURA 6 – VFTO incidente nos terminais de 230 kV do transformador, disjuntor sem capacitores paralelos. A frequência da componente dominante é diferente em função da chave seccionadora que for manobrada. Isso ocorre devido ao fato de que as sobretensões são formadas pela superposição das ondas refletidas e cada seccionadora apresenta uma distância diferente aos pontos de descontinuidade principais. A pior situação é encontrada quando se manobra as seccionadoras no lado da barra, mas por critérios operacionais, a sequência adotada é a seguinte:

- Desligamento de transformador
 - Abertura do disjuntor
 - Abertura da seccionadora no lado do transformador
 - Abertura da seccionadora no lado da barra
 - Fechamento das lâminas de terra
- Energização do transformador
 - Abertura das lâminas de terra
 - Fechamento da seccionadora no lado da barra
 - Fechamento da seccionadora no lado do transformador
 - Fechamento do disjuntor

Essa sequência de operações faz com que a frequência da componente dominante da VFTO que atinge o transformador seja mais baixa.

O valor das capacitâncias, principalmente o valor da capacitância de gradação, afeta a amplitude dos pulsos de VFTO, tendo pouca influência no espectro de frequências. O espectro de frequências é afetado principalmente pela topologia da GIS, mais especificamente a distância da chave aos principais pontos de descontinuidade da impedância característica da GIS. Para ilustrar esse efeito o caso mais severo de manobra de chave seccionadora no lado da barra foi repetido considerando a existência de capacitores de gradação com 2 nF, ver Figura 7.

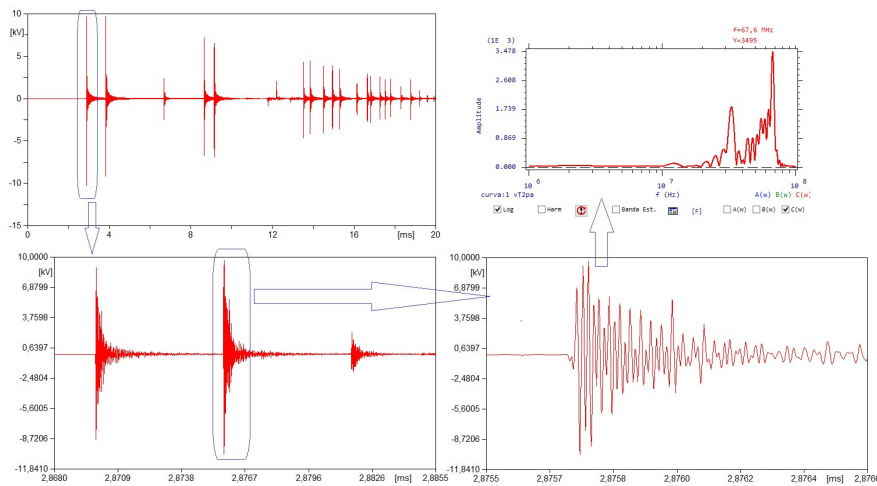


FIGURA 7 – VFTO incidente nos terminais de 230 kV do transformador, disjuntor com capacitores de gradação

A Figura 8 mostra a comparação entre o espectro de frequências do pulso mais severo de VFTO, com e sem capacitores de gradação. Sem capacitores de gradação a frequência da componente dominante é ligeiramente mais elevada, mas com uma amplitude muito mais baixa.

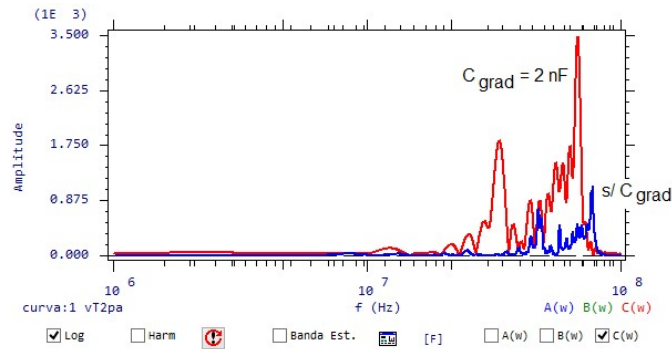


FIGURA 8 – Efeito da presença de capacitores de gradação no espectro de frequências da VFTO

4.0 - EFEITO DAS VFTO SOBRE O TRANSFORMADOR

Existe uma diferença fundamental entre as solicitações impostas pelas sobretensões de impulso e de VFTO. As sobretensões de impulso são raras durante a vida do transformador. Na prática as mais severas são aquelas realizadas durante os ensaios de aceitação, quando se aplicam 5 impulsos com onda cortada. Quando instalado, desde que a coordenação de isolamento seja feita corretamente, as sobretensões que alcançam o transformador são limitadas pela atuação dos para-raios, não ultrapassando 85 % do NBI.

Já para as VFTO, toda e cada manobra efetuada numa GIS produz VFTO. Medições de campo mostraram, que mesmo quando se manobra outro vão, as VFTO se propagam e acabam atingindo todos os transformadores. Mesmo desconectado o transformador pode ser impactado por VFTO, a menos que a seccionadora de transformador esteja aberta (4). A cada manobra o transformador é impactado por um trem de pulsos, ver Figuras 6 e 7. O número de pulsos pode chegar a dezenas por cada manobra, totalizando milhares de pulsos atingindo o transformador a cada ano. A amplitude dos pulsos é baixa, mas o efeito das altas frequências se faz notar pela corrente de deslocamento.

5.0 - CONCLUSÕES

Este relatório analisa as solicitações dielétricas que são impostas aos transformadores de potência acoplados a subestações isoladas a gás (GIS) e as compara com as solicitações a que são submetidos transformadores conectados a subestações convencionais (AIS). Como a utilização de linhas subterrâneas de extra alta tensão tem se tornado mais comum, a combinação de uma GIS com linha subterrânea é incluída na comparação. As solicitações analisadas são as sobretensões de impulso e as VFTO.

Sobre as sobretensões de impulso as seguintes conclusões foram alcançadas:

- Uma GIS suprida por linhas aéreas apresenta níveis de sobretensão de impulso nos transformadores de potência pouco acima do observado em uma AIS;
- Uma GIS suprida por linhas subterrâneas apresenta sobretensões de impulso mais baixas do que uma AIS, contudo a duração da sobretensão apresenta uma duração mais longa, devido ao efeito da capacitância dos cabos.

Quanto às VFTO, as seguintes conclusões foram alcançadas:

- As VFTO são originadas a partir das manobras de chaves seccionadoras associadas com um disjuntor aberto;
- A amplitude da VFTO é tanto mais elevada quanto maior for a capacitância entre os contatos do disjuntor associado à chave seccionadora sendo manobrada, desse modo em subestações onde os disjuntores não dispõem de capacitores de gradação a amplitude das VFTO é mais baixa;
- As VFTO são compostas por trens de pulsos, cada manobra origina dezenas ou até mesmo centenas de pulsos;
- O espectro de frequência dos pulsos de VFTO depende da localização da chave na subestação, posto que a sobretensão é originada pela superposição de ondas refletidas e essas reflexões dependem da posição da chave manobrada em relação aos pontos de descontinuidade na subestação;
- Em uma AIS as manobras de uma chave seccionadora produzem uma sobretensão com frente de onda muito mais lenta do que as que se observam em uma GIS, devido ao efeito do solo na propagação.

Outro ponto a considerar sobre as VFTO é que em uma GIS, toda e cada manobra de chave seccionadora provoca a propagação de pulsos de VFTO. Como em uma GIS o retorno é feito pelo involucro, a atenuação é baixa e os pulsos se propagam por toda a subestação. Assim os transformadores são submetidos ao impacto de milhares de pulsos a cada ano e caso os disjuntores contem com capacitores de gradação esses impulsos serão mais severos.

O efeito desses pulsos de VFTO é o de provocar uma concentração na distribuição de tensão e provocar um aquecimento no isolamento entre as espiras. Esse aquecimento localizado provocado pelas VFTO acaba por acelerar o envelhecimento do isolamento, levando à falha do transformador.

6.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) IEC-60071 - 1 Insulation Co-ordination – Part 1 – Definitions, principles and rules.
- (2) Kraus, J.D., Carver K.R. Electromagnetics, segunda edição, McGraw-Hill, 1973.
- (3) Miguel, P.M. Comparison of Surge Arrester Models. IEEE Transaction on Power Delivery, v. 29, n. 1, p. 21-28, 2014.
- (4) Miguel, P.M., Teixeira Jr, J.A., Ravaglio, M.A., Silva, J. M. M., Martins C.L.L., Fontanella C.A.A., Moraes G.F., Castioni, J.C.O. Comparison between measured and simulated VFTO in 525 kV GIS – CIGRÉ session 47, CIGRÉ – França, 2018.

7.0 - DADOS BIOGRÁFICOS



Gracita Batista Rosas é graduada em Engenharia Elétrica pela Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR, com Especialização em Proteção de Sistemas pela Universidade Federal de Itajubá, mestrado em Sistemas de Potência pela Universidade Federal do Paraná – UFPR e desde 2017 é aluna de Doutorado em Engenharia Elétrica da UFPR. Atualmente participa da Equipe de Estudos de Transitórios Eletromagnéticos de Sistemas de Transmissão, da divisão de Planejamento e Estudos Elétricos da Companhia Paranaense de Energia – COPEL.

Pablo Mourente Miguel é graduado em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal do Rio de Janeiro – UFRJ, com mestrado e doutorado pela COPPE/UFRJ. Atualmente é engenheiro consultor na empresa TgDelta Engenharia e Consultoria Ltda – Rio de Janeiro.

Marcelo Gonçalves é Engenheiro Eletricista com formação em Sistema de Potência, graduado pela Universidade Federal Fluminense – UFF. Atualmente trabalha na Empresa Jordão Engenharia, sendo responsável pela área de estudos elétricos envolvendo fenômenos de transitórios eletromagnéticos. Tem conhecimento em Fluxo de Potência – ANAREDE, Curto-Circuito – ANAFAS, ATP-EMTP – Transitórios Eletromagnéticos.

Venilton Rodrigues de Oliveira Engenheiro Eletricista Sênior, com formação em Sistemas de Potência, com conhecimento do Sistema Elétrico Brasileiro. Com grande experiência em estudos regime permanente, transitório eletromecânico, comissionamento, modelagem e ajuste de equipamento de controle, tais como: Reguladores de Tensão (RT), Reguladores de Velocidade (RV), estabilizador de sistemas de potência (PSS), compensadores estáticos (SVC), capacitor série controlável (TCSC). Grande experiência com programas de simulação, entre eles: ANAREDE, ANATEM, ANAFAS, PACDYN, PSCAD/EMTDC e algum conhecimento nos seguintes programas ATP/EMTP e Eurostag. Hoje é sócio da empresa Jordão Engenharia, uma empresa reconhecida pela Aneel com uma das 10 empresas que mais se envolvem em projetos de Pesquisa & Desenvolvimento.

Hélio Pessoa de Oliveira Júnior é graduado e pós-graduado em Engenharia Elétrica pela Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Atualmente é engenheiro eletricista do Operador Nacional do Sistema – ONS, responsável pela avaliação de estudos de engenharia, dimensionamento e aquisição de equipamentos para incorporação e posterior operação na Rede Básica, além de participar da elaboração de Anexos Técnicos para Editais de Leilões de Transmissão CA e CC. Participou ativamente do projeto das transmissões em corrente contínua dos complexos do Madeira e Belo Monte, envolvendo-se na elaboração do Anexo Técnico e no acompanhamento dos estudos e especificações das instalações, nas etapas de concepção e de detalhamento do projeto.

Miguel Armino Saldanha Mikilita é graduado em Engenharia Elétrica pela Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR, com Especialização em Sistemas de Potência pela Universidade Federal de Itajubá e mestrado em Sistemas de Potência pela Universidade Federal do Paraná – UFPR. Atualmente participa da Equipe de Estudos de Transitórios Eletromagnéticos de Sistemas de Transmissão, da divisão de Planejamento e Estudos Elétricos da Companhia Paranaense de Energia – COPEL.

Jeferson Shimomura é graduado em Engenharia Elétrica pela Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR. Possui vasta experiência em projetos eletromecânicos, elétricos, civis e de subestações em sistemas de geração, transmissão e distribuição de energia. Possui experiência também em instruções técnicas operacionais

relacionadas a implantação de subestações no âmbito destes sistemas. Atualmente gerencia o Departamento de Engenharia de Subestações da Companhia Paranaense de Energia – COPEL.