

Análise da Tensão de Restabelecimento Transitória em Diferentes Topologias de um Sistema de Potência

Aquiles Saccol Borin

Centro de Excelência em Energia e
Sistemas de Potência
Universidade Federal de Santa Maria
Santa Maria, Brasil
aquilesborin@gmail.com

Ghendy Cardoso Jr.

Centro de Excelência em Energia e
Sistemas de Potência
Universidade Federal de Santa Maria
Santa Maria, Brasil
ghendy@ufsm.br

Aécio de Lima Oliveira.

Centro de Excelência em Energia e
Sistemas de Potência
Universidade Federal de Santa Maria
Santa Maria, Brasil
aecio.oliveira@ufsm.br

Resumo — O crescente consumo de energia elétrica demanda que novas fontes de energia sejam inseridas no sistema elétrico brasileiro, gerando mudança no nível de curto-circuito das subestações já existentes. Sendo os disjuntores de potência afetados por essa mudança. Um dos fenômenos que sofre essa influência é a tensão de restabelecimento transitória (TRT). Se o disjuntor não suportar a TRT, ele pode reiniciar o curto-circuito promovendo prejuízos ao sistema. Este trabalho propõe a avaliação da variação dos valores máximos de tensão alcançados por uma TRT de acordo com diferentes formas de topologias de um sistema elétrico de potência.

Keywords — *Curto-Circuito, Equivalentes Elétricos, Superação de disjuntores, Tensão de Restabelecimento Transitória, Transitório Eletromagnético.*

I. INTRODUÇÃO

O Sistema Elétrico Brasileiro (SEB) está em constante ampliação e tornando-se cada vez mais interligado. Essas mudanças afetam a proteção do SEB. Com a inserção de novas linhas ou geradores, os estudos de proteção das subestações devem ser reavaliados. Os curtos-circuitos tendem a aumentar a sua amplitude e um dos equipamentos mais afetados é o disjuntor de potência.

O disjuntor deve operar continuamente na posição fechada, em que permite a passagem de corrente ao restante do sistema. Porém, mediante a presença de faltas, o disjuntor deve mudar para a posição aberta, propiciando o isolamento elétrico e a interrupção da corrente de falta [1]. Além disso, o disjuntor também pode ser utilizado para manobras em operação normal.

As condições mais severas que um disjuntor pode ser exposto são provocadas mediante a interrupção de correntes de falta [2]. Na abertura do equipamento, a tensão entre os terminais do disjuntor aumenta rapidamente, passando por um momento transitório [3]. Este fenômeno é denominado tensão de restabelecimento transitória (TRT). Caso o dielétrico do disjuntor não suporte o rápido aumento e elevado pico de tensão causado pela TRT, o curto-circuito pode ser reiniciado, podendo danificar os equipamentos a ele conectados.

Para evitar a superação por TRT é necessário que os disjuntores estejam projetados para suportar esse fenômeno. Para isso, é necessário que sejam realizados estudos de transitório em todos os disjuntores de uma subestação. Para

auxiliar nessa tarefa, foi elaborado um guia de aplicação para estudos de TRT em disjuntores de potência [4].

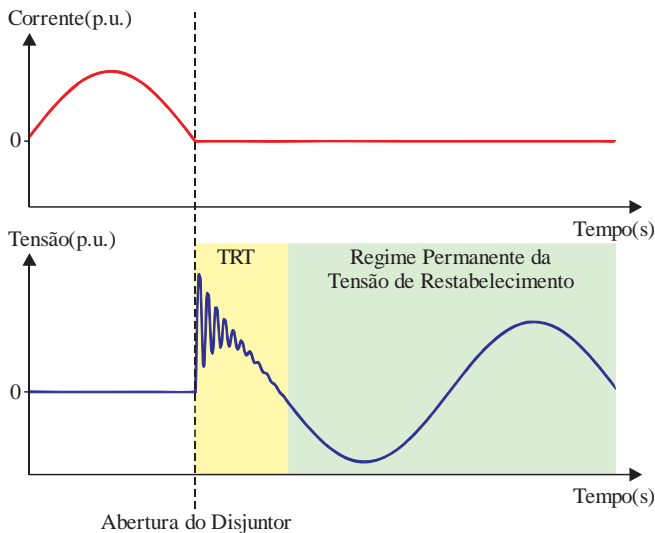
Este trabalho tem o objetivo de realizar estudos de TRT utilizando dados reais do Sistema Interligado Nacional (SIN) de forma a considerar diferentes números de barras (subestações) e avaliar a sua influência nas TRT em disjuntores.

II. TENSÃO DE RESTABELECIMENTO TRANSITÓRIA

A TRT é um fenômeno transitório de tensão que ocorre entre os terminais do disjuntor de potência a partir da extinção da corrente em sua abertura [4]. Ao interromper a corrente, através da separação dos contatos e extinção do arco elétrico, é observada uma tensão entre os terminais do disjuntor. Pela característica do arco elétrico, a corrente deve ser interrompida na passagem por zero [5]. Um dos terminais do disjuntor está conectado ao sistema que está energizado. Já o outro terminal não possui mais o potencial elétrico, porém ainda está referenciado a terra seja por transformadores a jusante, cargas ou pela falta. Isto faz com que entre os terminais do disjuntor surja uma tensão, que em regime permanente é a própria tensão do sistema. Esta tensão é denominada Tensão de Restabelecimento.

A tensão de restabelecimento, conforme Figura 1, pode ser avaliada em dois momentos sucessivos. O primeiro, ao abrir os terminais, a corrente que passa pelo disjuntor decai a zero e um transitório de alta frequência é observado na tensão. No segundo instante, após o transitório de tensão, a tensão do sistema de potência é estabelecida. O primeiro instante é denominado Tensão de Restabelecimento Transitória ou TRT.

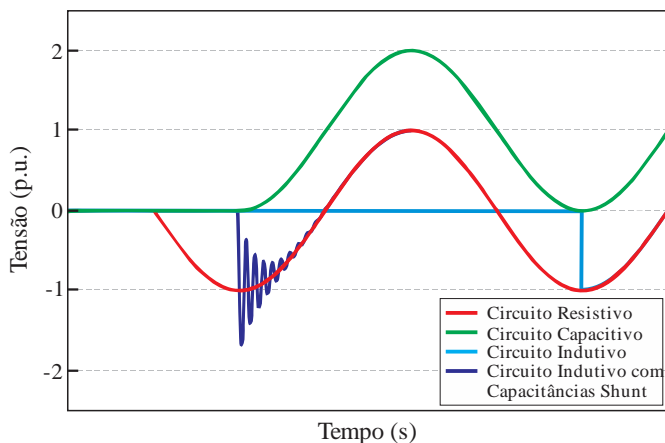
Caso o disjuntor não suporte os níveis de tensão da TRT, o mesmo é considerado superado. Perdendo assim seu dielétrico e reiniciando o curto-circuito. Ao interromper a corrente através da abertura de seus contatos, há o aparecimento de um arco elétrico. O arco rapidamente perde condutividade quando a corrente aproxima-se de zero e a corrente para de fluir no sistema. A resposta do sistema elétrico com relação a interrupção da corrente gera a TRT. O sistema elétrico possui uma característica predominantemente indutiva, e como um indutor, ao ser interrompida sua corrente gera o aumento de tensão em seus terminais como resposta.



^a. Adaptado de [3].

Figura 1. Tensão de restabelecimento transitória

A Figura 2 apresenta o comportamento de circuitos de diferentes características.



^a. Adaptado de [3].

Figura 2. Restabelecimento de Tensão em Diferentes Tipos de Circuitos

A forma de onda vermelha representa um circuito puramente resistivo. As formas de onda verde e azul claro representam circuitos puramente capacitivo e puramente indutivo respectivamente. Já em azul escuro, está representado a resposta de um circuito predominantemente indutivo, porém com capacitâncias shunt. Sendo esta característica que compõe os sistemas elétricos de potência. O transitório observado pela onda azul escura é uma TRT.

Para o dimensionamento do disjuntor deve-se levar em consideração as duas características: a taxa de crescimento da tensão a partir da interrupção da corrente e a amplitude máxima de tensão que a oscilação gera. Cada disjuntor possui características que limitam a sua capacidade de máxima tensão e taxa de crescimento. A taxa de crescimento da TRT é o valor máximo que a derivada do crescimento da TRT pode apresentar. Este parâmetro é medido em $kV/\mu s$. Já, a amplitude

máxima, medida em kV, representa o maior valor instantâneo da TRT. Além da interrupção da corrente, a operação de abertura de um disjuntor é considerada bem sucedida quando suportar os valores da TRT e da tensão de restabelecimento.

A TRT pode ser prejudicial em sistemas que possuam disjuntores mal dimensionados. As mudanças nas características do sistema elétrico contribuem para a superação do disjuntor. Assim, a ampliação de subestações, troca de equipamentos e novas unidades geradoras são fatores que contribuem para a superação. A superação de disjuntores por TRT pode ocasionar desde a falha na interrupção da falta até danos permanentes em seu dielétrico.

III. DADOS E SIMULAÇÃO

Os dados utilizados para este trabalho foram retirados do arquivo BR1412A.ANA disponibilizado pelo Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS). Este arquivo é utilizado para estudos de curto-circuito, contendo informações de todo o SIN, como impedância de geradores, linhas de transmissão e transformadores. O arquivo possui dados de todo o SIN, sendo que o número de barras (Subestações) do sistema é elevado. O SIN possui 11758 barras registradas e um número equivalente de interconexões (linhas de transmissão, transformadores, etc.) entre as mesmas, tornando a simulação desse sistema muito complexa.

A solução encontrada foi reduzir os circuitos a um número de barras que contenham a subestação ou subestações que se deseja estudar. Isso é possível através do Teorema de Thévenin, o qual possui uma técnica que permite reduzir circuitos elétricos. O resultado dessa redução é um circuito equivalente ao circuito original, que mantém as suas características. Para se referir ao circuito reduzido pelo Teorema de Thévenin será utilizada a nomenclatura equivalentes elétricos. Os arquivos atuais para estudo de curto-circuito podem ser encontrados em [6].

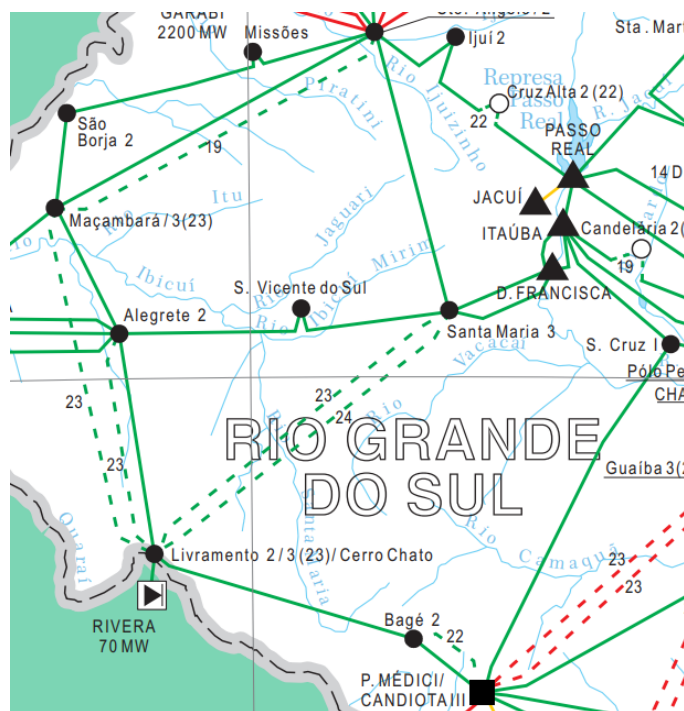
O programa computacional utilizado para a determinação de equivalentes elétricos foi o ANAFAS® desenvolvido pelo Cepel – Centro de Pesquisas de Engenharia Elétrica da empresa Eletrobrás [7]. Anafas significa Análise de Falhas Simultâneas. A determinação de equivalentes elétricos é uma de suas ferramentas. Outra ferramenta que será usada é o cálculo de curto-circuito em barras do SIN. Para a determinação dos equivalentes elétricos é necessário escolher as barras que não serão reduzidas, ou seja, as barras que terão os dados de suas conexões preservadas (linhas de transmissão, geradores, transformadores, etc.). Essas barras o ANAFAS denomina como barras retidas. O restante do sistema elétrico será reduzido a impedâncias e fontes de tensão que representarão o seu comportamento. O programa pode gerar um ou mais equivalentes elétricos inseridos em barras conectadas ao restante do sistema. As barras que são conectadas aos equivalentes elétricos são denominadas barras de fronteira. Em sua maioria os equivalentes elétricos são fontes de tensão com uma impedância conectados a barra de fronteira, mas há casos em que é gerado também linhas de transmissão fictícias entre as barras de fronteira para que os circuitos equivalentes emulem fielmente o SIN.

A subestação escolhida para os estudos deste trabalho é a subestação Santa Maria 3 ou SMARIA3 de código 28230 como é encontrada no arquivo de dados. As barras das subestações conectadas a Santa Maria 3 são utilizadas como barras de fronteira nos casos que serão avaliados. Os valores de impedância encontrados no arquivo de dados estão na forma percentual (%) contendo tanto as impedâncias de sequência positiva como as impedâncias de sequência zero. A potência base do sistema é 100 MVA e a tensão de base é 230 kV.

A TRT, por se tratar de um fenômeno transitório, será estudada no programa ATP-EMTP [8] através da seu pré-processador gráfico ATPDraw [9]. Este programa foi desenvolvido para simular fenômenos elétricos transitórios em circuitos através do domínio do tempo e, portanto, se mostra adequado ao estudo da TRT.

IV. TOPOLOGIAS

No SIN, os centros de consumo estão conectados entre si, juntamente com os centros de geração de energia, tornando o sistema brasileiro interligado. A vantagem de possuir um sistema interligado é a maior confiabilidade que o sistema possui. Se uma linha de transmissão sofre uma falta e é isolada, a energia pode ser redirecionada por outras linhas de transmissão, fazendo com que o mínimo possível de regiões seja afetado. A Figura 3 mostra uma parcela do SIN, mais precisamente localizado na região sul do Brasil. Os pontos presentes na figura representam subestações, enquanto as linhas representam o sistema de transmissão que interconecta as subestações. As cores definem o nível de tensão, em que as linhas em amarelo possuem o nível de tensão de 138 kV, as linhas em verde possuem tensão de 230 kV e em vermelhos as linhas que operam com tensão de 500 kV.



Adaptado Mapa do Sistema Elétrico Brasileiro Configuracao 2027_sem abengoa.cdr.

Figura 3. Sistema Integrado Nacional – Rio Grande do Sul

As subestações selecionadas para os casos a seguir operam em 230 kV, logo não aparecerá transformadores nos dados a serem modelados, somente geradores e linhas de transmissão. A TABELA I. apresenta todas as linhas de transmissão que serão usadas nos casos apresentados neste capítulo. Somente as impedâncias de sequência positiva estão sendo apresentadas, pois os estudos só irão abordar curto circuitos trifásicos. O curto-circuito trifásico é o mais severo para a análise de TRT. As capacitâncias descritas na tabela serão usadas no Caso 4 deste capítulo.

A partir da Figura 3 e TABELA I. serão considerados 4 casos de estudo com diferentes números de barras de fronteira e com a inserção das capacitâncias nas linhas de transmissão. Estes casos serão comparados entre si para análise nos capítulos futuros desse artigo.

TABELA I. LINHAS DE TRANSMISSÃO

Linhas de transmissão				
De	Para	R+ (%)	X+ (%)	C (µF)
SMARIA3	SE DCHICA	1,12	6,25	0,6489
SMARIA3	SE DCHICA	1,168	5,936	0,648
SMARIA3	SVICEN	1,492	8,216	0,705
SE DCHICA	UITA	0,394	2,237	0,199
SE DCHICA	UITA	0,394	2,204	0,199
SVICEN	ALEGRETE	1,573	9,408	0,883
ALEGRETE	LIVRAN2	2,45	12,23	1,099
BAGE	UPME	0,87	4,81	0,441
LIVRAN2	BAGE	2,89	14,44	1,279
S.CRUZ	UITA	2,21	12,08	1,106
ALEGRETE	MACANB	1,582	7,889	0,71
MACANB	SANGELO	2,26	18,36	1,80
SANGELO	SANGEL2	0,05	0,37	1,87
UITA	UPRE	0,52	2,87	0,262

A. Caso Base: Sistema com 1 barra de fronteira

A topologia com 1 barra de fronteira será a topologia mais simples avaliada, representada neste caso base pela Figura 4. Ela é a topologia indicada por [4] para o estudo de TRT. A barra em que será executado os estudos de TRT é a barra de Santa Maria 3, indicada em vermelho na Figura 4. Logo, as barras das subestações vizinhas a Santa Maria 3 serão as fronteiras dos equivalentes calculados. Ou seja, a informação entre as barras retidas (Santa Maria 3, Dona Francisca e São Vicente) serão preservadas. O restante do sistema interligado nacional será reduzido a fontes de tensão e impedâncias equivalentes, representados em azul na Figura 4. Para que o equivalente seja válido, a corrente de um determinado curto-circuito no sistema completo deve ser muito próxima do valor de curto-circuito em um sistema com equivalentes.

A fonte de tensão da barra SE DCHICA não está representada em azul por se tratar de uma usina real, logo ela é tratada como uma fonte real e não um equivalente. Nas tabelas II, III e IV alguns dos geradores classificados como equivalente são reais. O programa ANAFAS não faz distinção

disso. Nas Figuras 4, 5 e 6 foi usada a cor azul para diferenciar os geradores gerados pelo equivalente dos geradores que são reais.

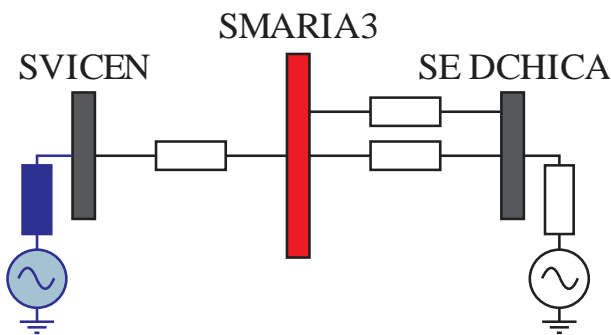


Figura 4. Sistema com 1 barra de fronteira

Os equivalentes elétricos serão inseridos nas barras de fronteira, no caso São Vicente e Usina de Dona Francisca. Cada equivalente refere-se a um gerador associado a uma impedância de sequência positiva, especificados na TABELA II.

TABELA II. EQUIVALENTES ELÉTRICOS COM 1 BARRA DE FRONTEIRA

Tipo de Equivalente	Equivalentes para 1 barras de fronteira			
	De	Para	R+ (%)	X+ (%)
Gerador	SE DCHICA	-	0,31506	29,532
Gerador	SVICEN	-	28,312	19,625

B. Caso 2: Sistema com 2 barras de fronteira

A segunda topologia avaliada é a topologia com 2 barras de fronteira, o que significa que as barras retidas para estudo estarão até duas barras de distância da barra da subestação principal. Nesse caso foram retidas mais duas barras em relação ao Caso Base, as barras referentes a ALEGRETE e UITA, sendo que estas serão as novas fronteiras para a inserção dos equivalentes elétricos do restante do sistema interligado. Uma representação gráfica do Caso 2 é apresentada na Figura 5.

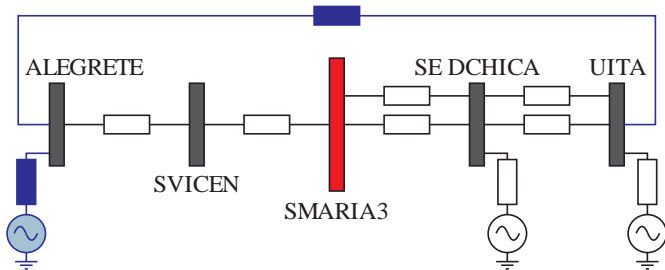


Figura 5. Sistema com 2 barras de fronteira

Em azul tem-se os equivalentes inseridos pelo ANAFAS, nesse caso, além de um gerador, o programa adicionou uma linha de transmissão equivalente entre ALEGRETE e UITA para o cálculo de curto-circuito. O resultado é demonstrado através dos equivalentes na TABELA III.

TABELA III. SISTEMA COM INSERÇÃO DE EQUIVALENTES A 2 BARRAS DE FRONTEIRA

Tipo de Equivalente	Equivalentes para 2 barras de fronteira			
	De	Para	R+ (%)	X+ (%)
Gerador	SE DCHICA	-	0,02	20,68
Gerador	UITA	-	0,22927	23,428
Gerador	ALEGRETE	-	12,834	9,846
L.T.	UITA	ALEGRETE	24,557	78,878

C. Caso 3: Sistema Malhado

Para a obtenção de equivalentes em um sistema malhado foram escolhidos dois caminhos fechados em torno da subestação de Santa Maria 3, conforme Figura 6.

O primeiro caminho é uma malha percorrendo as subestações ao norte de Santa Maria 3. Passando por subestações como Maçambará (MACAMB) e Usina do Passo Real (UPRE). A segunda malha percorre as subestações que ficam ao sul, passando por Bagé (BAGE) e Usina Presidente Médici (UPME).

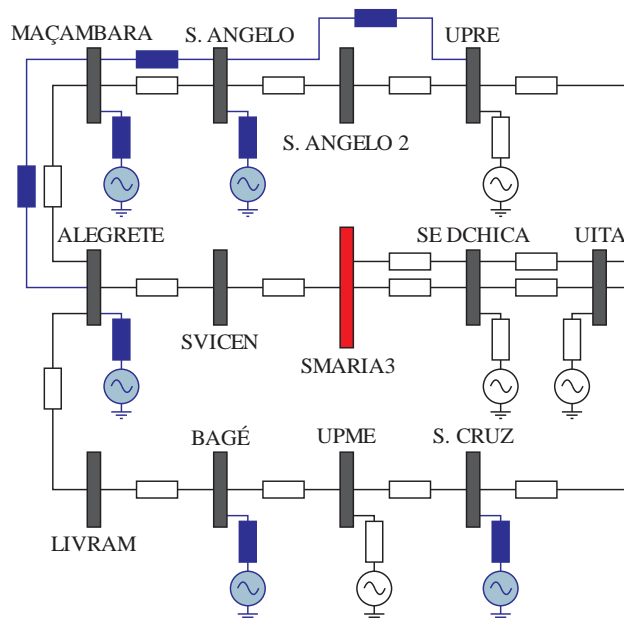


Figura 6. Sistema Malhado

A subestação de Santa Maria 3 está localizada ao centro da malha. Os equivalentes serão inseridos nas barras que possuem interconexões com outras barras do sistema. Os equivalentes elétricos considerados no Caso 3 são apresentados na TABELA IV.

TABELA IV. SISTEMA COM INSERÇÃO DE EQUIVALENTE EM MALHA

Tipo de Equivalente	Equivalentes para sistema malhado			
	De	Para	R+ (%)	X+ (%)
Gerador	SE DCHICA	-	0,02	20,68
Gerador	UITA	-	0,20516	43,428
Gerador	UPRE	-	0,6329	52,296
Gerador	UPME	-	0,0529	2,666

Tipo de Equivalente	Equivalentes para sistema malhado			
	De	Para	R+ (%)	X+ (%)
Gerador	S.CRUZ	-	26,143	17,093
Gerador	ALEGRETE	-	26,614	50,784
Gerador	BAGE	-	1390,1	2975
Gerador	S.ANGELO	-	0,24175	32,056
Gerador	MACANB	-	79,239	105,89
L.T.	SCRUZ	UPME	38,844	20,329
L.T.	ALEGRETE	MACANB	20,935	14,35
L.T.	MACANB	S.ANGELO	49,276	24,891
L.T.	S.ANGELO	UPRE	25,768	93,022
L.T.	S.ANGELO2	UPRE	2,987	14,023

D. Caso 4 – Inserção das capacitâncias das linhas de transmissão no sistema malhado

O Caso 4 usará os mesmos dados do Caso 3, porém com as capacitâncias das linhas de transmissão modeladas. Os valores das capacitâncias consideradas em cada linha de transmissão são apresentados na TABELA I. As capacitâncias foram obtidas através do arquivo que a ONS disponibiliza para a execução de fluxos de potência. Nenhum dos casos anteriores (Caso Base, Caso 2 ou Caso 3) havia considerado a presença das capacitâncias.

V. RESULTADOS E DISCUSSÕES

A subestação de Santa Maria 3 foi utilizada para os estudos de TRT em um de seus disjuntores. O disjuntor escolhido foi o disjuntor da linha de transmissão que conecta Santa Maria 3 (SMARIA3) a São Vicente do Sul (SVICEN). Para a simulação da TRT foi necessário realizar um curto-circuito na subestação de estudo (SMARIA3). O curto-circuito escolhido foi o trifásico-terra. Segundo [4] o curto-circuito trifásico é a falta que apresenta maiores amplitudes de tensão nos terminais do disjuntor. Foram simulados e comparados os quatro casos apresentados no Capítulo IV. O objetivo destas simulações é medir o efeito que a modelagem do sistema possui sobre o estudo de TRTs em disjuntores. A variável escolhida para a comparação foi a amplitude de tensão, que é um dos fatores para a superação de disjuntores. A envoltória do disjuntor não será apresentada nas simulações, devido ao fato de não se possuir as informações sobre os disjuntores instalados na subestação. Porém, o objetivo destas simulações é avaliar a influência da modelagem que o sistema possui sobre as TRTs.

O parâmetro a ser comparado para a superação dos disjuntores será a amplitude máxima da TRT, ou seja, o seu pico. As simulações que serão apresentadas a seguir objetivam fazer as seguintes comparações:

- Efeito da topologia da rede: sistema com 1 barra de fronteira *versus* sistema com 2 barras de fronteira *versus* sistema malhado;
- Efeito da representação das capacitâncias nas linhas de transmissão *versus* linhas de transmissão sem capacitâncias;

Os equivalentes utilizados para as simulações são os equivalentes apresentados no capítulo IV, possuindo 4

topologias que serão estudadas: Caso Base (com 1 barra de fronteira), Caso 2 (com duas barras de fronteira), Caso 3 (sistema malhado) e o Caso 4 (sistema malhado com as capacitâncias de todas as linhas de transmissão)

Os dados da subestação simulada, como informações de transformadores, foram retirados do arquivo de dados do ONS. Já os valores de capacitância dos disjuntores e chaves foram obtidos através de [4]. Os valores de curto-circuito na barra 230kV de Santa Maria 3 foram simulados no ATPDraw e comparados com o mesmo curto-circuito executado no ANAFAS. A TABELA V. apresenta os resultados obtidos, o curto-circuito comparado foi o trifásico na barra SMARIA3.

TABELA V. VALIDAÇÃO CURTO-CIRCUITO TRIFÁSICO

Topologia	Corrente de Curto-Circuito Trifásico (A)	
	ANAFAS	ATPDraw
Caso Base	5048	5031
Caso 2	5034	5035
Caso 3	5000	4982

A maior diferença observada na tabela é de 18 A no caso 3, o que resulta em um erro de 0,36%, o qual pode ser considerado de pequena magnitude. A seguir será apresentado a comparação entre os casos.

A. Caso Base versus Caso 2 versus Caso 3

A tensão avaliada na simulação é a diferença de potencial entre os terminais do disjuntor. A simulação já inicia com o curto-circuito trifásico e em 10ms o disjuntor é aberto. A Figura 7 apresenta a abertura do disjuntor no Caso Base. É possível perceber a TRT no primeiro semiciclo da tensão após a interrupção da corrente. A abertura do disjuntor ocorreu em 10ms, porém o disjuntor continuou conduzindo através do arco elétrico. Uma vez que a corrente passa por zero, o arco se extingue, interrompendo a corrente. Como resposta a isso, a tensão entre os terminais do disjuntor sobe rapidamente apresentando uma TRT.

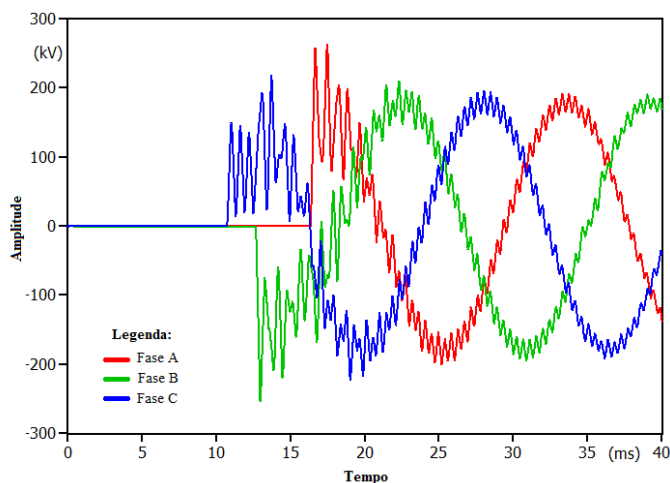


Figura 7. Abertura do disjuntor em 10ms

Tanto o Caso Base, quanto os Casos 2 e 3 foram simulados com a abertura do disjuntor a 10ms. Os valores da amplitude máxima da TRT podem ser observados na TABELA VI.

TABELA VI. AMPLITUDE MÁXIMA DA TRT

Topologia	Tensão de Pico (kV)		
	Fase A	Fase B	Fase C
Caso Base	262 (7,7%)	253 (9%)	217 (13,2%)
Caso 2	260 (8,4%)	251 (9,7%)	216 (13,6%)
Caso 3	284 (-)	278 (-)	250 (-)

As três topologias apresentaram diferenças entre os valores de pico de suas TRTs. O caso 3 (sistema malhado) apresentou amplitudes maiores em relação aos outros dois casos. Como o caso 3 foi o mais severo, usou-se ele como referência e foi comparado a diferença em porcentagem para os outros casos. O caso 3 poderia ser usado como resultado conservador na escolha da classe do disjuntor.

B. Caso 3 versus Caso 4

A seguir, foi realizada a comparação da amplitude máxima das TRT dos Casos 3 e 4, em que o Caso 4 é o Caso 3 acrescido das capacitâncias de todas as linhas de transmissão. A TABELA VII. apresenta os resultados das simulações. Ambas tiveram a abertura do disjuntor em 10ms.

TABELA VII. AMPLITUDE MÁXIMA

Topologia	Tensão de Pico (kV)		
	Fase A	Fase B	Fase C
Caso 3	284 (-)	278 (-)	250 (-)
Caso 4	258 (9,1%)	220 (20,8%)	191 (23,6%)

Com a modelagem das capacitâncias nas linhas de transmissão, a amplitude máxima das TRT foi reduzida, chegando a uma diferença de 23,6% em umas das fases.

O Caso 4 demonstra que com a modelagem das capacitâncias nas linhas de transmissão, os níveis de amplitude da TRT são menores que outros casos. O que influenciaria na escolha da classe de tensão do disjuntor, reduzindo-se o custo do mesmo.

VI. CONCLUSÃO

Este trabalho apresentou um estudo sobre TRT considerando diferentes topologias para as barras de fronteira em um curto-circuito. A influência da modelagem das capacitâncias também foi analisada.

Os resultados obtidos foram avaliados através da amplitude máxima da TRT. Foi possível notar que o Caso Base e o Caso 2 não diferenciam muito entre si. Já o Caso 3 os níveis de tensão aumentam, indicando TRT mais severa. A comparação entre os casos 3 e 4 mostrou que a inserção de capacitância é relevante para análise de TRT.

AGRADECIMENTOS

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES/PROEX) - Código de Financiamento 001.

REFERÊNCIAS

- [1] A. F. Jorge. Capítulo XIV do livro Equipamentos elétricos – especificação e aplicação em subestações de alta tensão. Rio de Janeiro: Furnas, 1985.
- [2] A. F. Jorge. Capítulo XVII do livro Transitórios elétricos e coordenação de isolamento – aplicação em sistemas de potência de alta tensão. Rio de Janeiro, Furnas, Niterói, Universidade Federal Fluminense/EDUFF, 1987.
- [3] R. W. Alexander, PPL, Senior Member IEEE, D. Dufournet, Alstom T&D, Senior Member IEEE. Transient Recovery Voltage (TRV) for High-Voltage Circuit Breakers.
- [4] IEEE C37.011-2019. Application Guide for Transient Recovery Voltage for AC High Voltage Circuit Breaker. 2019.
- [5] A. Ziani, e H. Moulai, “Arc quenching equations solving in HV circuit breakers by a general diagram bloc model,” in 3rd International Conference on Electric Power and Energy Conversion Systems, pp. 1-4, Istanbul, Turquia, Outubro de 2013.
- [6] EPE - Empresa de Pesquisa Energética – Dados para Simulações Elétricas do SIN - <https://www.epe.gov.br/pt/areas-de-atuacao/energia-eletrica/expansao-da-transmissao/dados-para-simulacoes-eletricas-do-sin>
- [7] CEPTEL, Análise de faltas simultâneas (ANAFAS) versão 7.0
- [8] ATP-EMTP. ATP-EMTP – Alternative Transients Program. Disponível em: <<https://www.emtp.org/>>. Acesso em: 6 jun. 2019.
- [9] ATPDRAW. ATPDraw Home. Disponível em: <<http://www.atpdraw.net/index.php>>. Acesso em: 5 jun. 2019