

ANÁLISE DA TENSÃO DE RESTABELECIMENTO TRANSITÓRIA EM DISJUNTOR DE ALTA TENSÃO: estudo de caso em uma instalação elétrica industrial

Cezar A. S. Oliveira
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica
Universidade Federal de Santa Maria
Santa Maria, RS
ceausio@bol.com.br

Adriano P. Morais, Ângelo F. Sartori, Fernando Guarda,
Ghendy Cardoso Jr., Luiz F. Freitas-Gutierrez
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica
Universidade Federal de Santa Maria
Santa Maria, RS

Resumo: Os padrões IEEE Std C37.011-2011 (2011) e IEEE Std C37.04b-2008 (2008) são guias técnicos para a análise e a especificação de disjuntores, estabelecendo capacidades máximas para evitar a superação frente a Tensões de Restabelecimento Transitórias (TRT). Este estudo tem como objetivo avaliar o desempenho com foco na TRT de um disjuntor isolado a gás SF₆ de uma subestação de 69 kV localizada em uma instalação elétrica industrial. Este trabalho é baseado nos limites operacionais estabelecidos pelas normas IEEE Std C37.011-2011 e IEEE Std C37.04b-2008 para investigar o comportamento da TRT durante curto-circuito. As simulações foram executadas através do EMTP-ATP e do seu pré-processador gráfico ATPDraw. Os resultados mostram a necessidade de se realizar uma análise de TRT detalhada durante o desenvolvimento do projeto, de forma a garantir o dimensionamento adequado do disjuntor.

Palavras-chaves - ATPDraw, disjuntor, instalação elétrica, limites de envoltória, tensão de restabelecimento transitória.

I. INTRODUÇÃO

Os disjuntores são equipamentos que desempenham um papel fundamental para garantir o bom funcionamento e a proteção em instalações elétricas industriais. Por esse motivo, exigem atenção especial em seu dimensionamento e em estudos de superação. Esta análise de superação é realizada através de comparação das características técnicas nominais dos equipamentos com as solicitações imposta pela rede [1].

Os estudos de superação por corrente de carga ou por corrente de curto-circuito são amplamente conhecidos e inclusive realizados para outros equipamentos. Já a análise de superação por Tensão de Restabelecimento Transitória (TRT) é realizada somente em disjuntores e, em geral, é uma tarefa mais complexa. Nesse contexto, existem ainda preocupações do setor industrial com o estabelecimento de TRT em disjuntores, pois esse fenômeno é crítico e pode afetar diretamente o desempenho dos equipamentos de proteção [2].

Com decorrer do tempo, muitas mudanças e expansões acontecem no Sistema Elétrico de Potência (SEP) como a inserção de novas cargas, a substituição de equipamentos e a integração de novas unidades geradoras. Essas alterações modificam as impedâncias equivalentes da instalação elétrica e, conseqüentemente, podem aumentar os níveis de corrente de curto-circuito. Dessa forma, há maiores possibilidades de comprometimento do funcionamento de disjuntores já instalados por superação de TRT. Além disso, existem recomendações de estudos de TRT quando novos disjuntores são integrados a sistemas elétricos [3].

Em situações em que não existem informações completas sobre o sistema elétrico é possível extrair as formas de onda de TRT através de métodos adaptativos [4].

Neste trabalho foi realizada uma análise de TRT em um disjuntor industrial em alta tensão com dados reais de uma subestação elétrica. Essas informações técnicas foram adicionadas ao ATPDraw e analisados os resultados das TRT. Diferentes cenários de estudos são averiguados como, por exemplo, provocando alterações nos circuitos equivalentes da rede elétrica e no nível de tensão, pressupondo que características do sistema elétrico do agente distribuidor mudaram.

II. TENSÃO DE RESTABELECIMENTO TRANSITÓRIO

Segundo [5], a TRT é a diferença de potencial elétrico entre a resposta do sistema elétrico no lado da fonte e no lado da carga do disjuntor em abertura. Em outras palavras, é o transitório que surge entre os contatos elétricos do disjuntor durante a sua abertura para um curto-circuito no sistema elétrico. Há o surgimento de um arco elétrico no interior do equipamento que rapidamente perde condutividade quando a corrente elétrica instantânea se aproxima de zero. Após a eliminação do arco, caso o valor máximo da TRT seja superior a tensão mínima necessária para romper a rigidez dielétrica do meio isolante no interior do disjuntor, pode ocorrer uma reignição, ou seja, uma TRT no sentido contrário. Esse

fenômeno é denominado *restrike* e pode provocar danos estruturais irreversíveis ao equipamento [6].

O formato da forma de onda apresentada por uma TRT depende do tipo de carga que o disjuntor está protegendo, podendo demonstrar um caráter resistivo, indutivo ou capacitivo. Segundo [3], existem ainda outros fatores que contribuem com a TRT e o formato do sinal:

- Indutâncias e aterramento do sistema;
- Nível de corrente de curto-circuito a ser interrompida;
- Capacitância intrínseca de elementos do sistema;
- Posição no sistema onde está alocado o disjuntor;
- Parâmetros e constantes internas do disjuntor.

Considera-se que um disjuntor não foi superado quando nenhum ponto da envoltória (capacidade máxima do disjuntor) for ultrapassado pela forma de onda da TRT, ou seja, o valor instantâneo da tensão não atinge um limiar padronizado [7]. Caso confirmado, a operação do disjuntor foi bem-sucedida e ele é capaz de suportar os níveis de TRT impostos no estudo. A Figura 1 apresenta um exemplo de disjuntor sem superação por TRT.

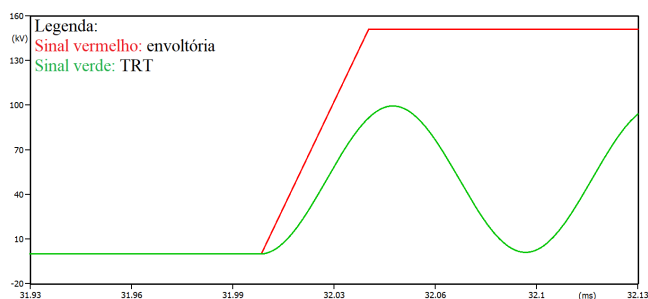


Fig. 1. Disjuntor sem superação por TRT. Fonte: Adaptado de [5]

Considera-se o disjuntor superado por TRT quando a magnitude ou a taxa de crescimento da tensão ultrapassa os limites dielétricos e térmicos admissíveis [1]. Por esses motivos, justifica-se a necessidade de estudos de TRT para garantir e assegurar que o disjuntor esteja dentro dos limites de suportabilidade eletromecânica e realize uma operação confiável e sem riscos.

A Figura 2 mostra um exemplo de disjuntor superado em que a magnitude da TRT ultrapassa a curva limite (capacidade máxima do disjuntor).

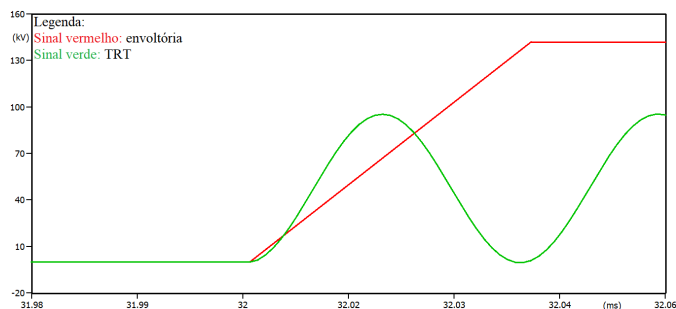


Fig. 2. Disjuntor superado por TRT. Fonte: Adaptado de [5]

A. Limites de TRT definidos em padrões e regulamentações

De acordo com [8], existem dois tipos de envoltórias normalizadas, uma envoltória modelada com dois parâmetros e uma outra com quatro parâmetros. Os limites da capacidade de interrupção dos disjuntores são estipulados pela classe tensão e pela configuração do sistema de aterramento. A envoltória com dois parâmetros é aplicada a sistemas com tensão até 100 kV, enquanto, a envoltória com quatro parâmetros é utilizada em sistemas com tensões acima de 100 kV. As principais características da envoltória de dois parâmetros são a amplitude máxima e a taxa de crescimento da TRT. O valor máximo da amplitude da TRT é definido por uma reta na horizontal medida em kV. Os limites da taxa de crescimento são determinados por uma reta inclinada e medida em kV/ μ s [3]. Para um melhor entendimento sobre a normalização, algumas definições técnicas são detalhadas na sequência deste trabalho.

B. Taxa de aumento da tensão de recuperação (TCTRT)

A taxa de aumento da tensão de recuperação (TCTRT) é a inclinação máxima da tangente da envoltória, iniciando a partir do instante da interrupção do disjuntor. A TCTRT pode ser enquadrada como T_{10} , T_{30} , T_{60} e T_{100} . Isso significa a máxima corrente de curto-circuito que o disjuntor será submetido no ponto de instalação, respectivamente 10%, 30%, 60%, e 100% de sua capacidade nominal [3].

As principais variáveis utilizadas na modelagem das envoltórias são as seguintes:

- u_c : tensão máxima de TRT, usado em ambas envoltórias;
- u_1 : primeira tensão de referência, usado em envoltórias a quatro parâmetros;
- u' : tensão de referência, usado em ambas envoltórias;
- t_d : tempo de atraso;
- t' : tempo para alcançar u' ;
- t_1 : tempo para atingir u_1 , usado em envoltórias a quatro parâmetros;
- t_2 : tempo para atingir u_c , usado em envoltórias a quatro parâmetros;
- t_3 : tempo para atingir u_c , usado em envoltórias a dois parâmetros.

As propriedades u_c e t_3 são utilizadas na modelagem para envoltórias a dois parâmetros. Por outro lado, u_1 , t_1 , u_c e t_2 são utilizadas na modelagem de envoltórias a quatro parâmetros. As Figuras 3 e 4 ilustram as envoltórias com dois e quatro parâmetros, destacando as propriedades discutidas anteriormente.

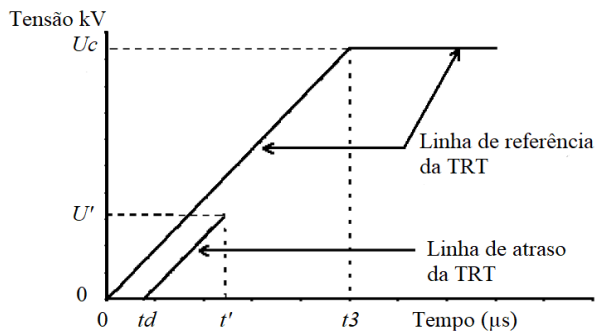


Fig. 3. Dois parâmetros. Fonte: Modificado de [9]

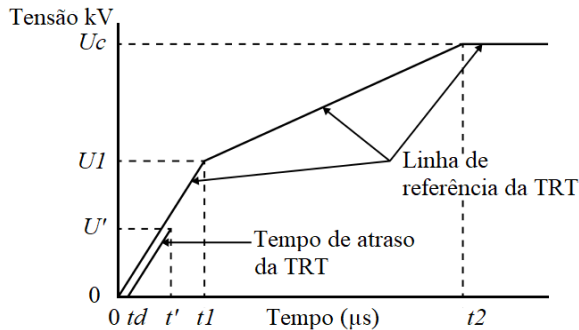


Fig. 4. Quatro parâmetros. Fonte: Modificado de [9]

III. MODELAGEM NO ATPDRAW DO SISTEMA ELÉTRICO

Neste estudo optou-se pelo uso do pré-processador gráfico ATPDraw para EMTP-ATP para análise das TRT em disjuntores. A análise de superação por TRT foi realizada em um disjuntor instalado em uma subestação real alimentada por uma linha de transmissão em 69 kV. O disjuntor analisado é do tipo *Live Tank*, fabricado para a tensão de 72,5 kV, com corrente nominal de 2,5 kA e capacidade de interrupção de corrente de curto-circuito assimétrica de 31,5 kA. O disjuntor (DJ) está instalado a 59 metros do ponto de entrega de energia (Fonte) e a 5 metros da barra 104, conforme mostra a Figura 5.



Fig. 5. Diagrama unifilar com disjuntor DJ

O sistema foi modelado a partir de dados técnicos equivalentes da rede informada pela concessionária de energia elétrica no ponto de entrega conforme mostra a Tabela I.

TABELA I. DADOS TÉCNICOS DA REDE

Parâmetros Equivalentes			
Relação X/R	1,82	Relação X/R	3,237
Impedância (Ω) $Z_{(+)} = Z_{(-)}$		Impedância (Ω) $Z_{(0)}$	
14.2206 + j 25.9097		7.02496 + j 22.7412	

A Tabela II ilustra os dados de capacitâncias intrínsecas dos equipamentos de pátio da subestação, obtidas juntos aos fabricantes. As capacitâncias dos trechos de cabos estão distribuídas de acordo com o modelo PI.

TABELA II. CAPACITÂNCIAS INTRÍNSECAS DOS EQUIPAMENTOS

Equipamentos	(pF)		
Transformador de potencial	350		
Transformador de corrente	1000		
Trechos de cabos entre barras	11,64/m		
Disjuntor	C1	C2	C3
	14	18	11

A Tabela III apresenta os valores das impedâncias nos trechos de cabos do circuito de alta tensão no interior da subestação.

TABELA III. IMPEDÂNCIA DOS CABOS

Impedâncias	(Ω)
$R_{(0)}$	1,578E-5
$L_{(0)}$	2,766E-5
$R_{(+)}$	7,68E-6
$L_{(+)}$	1,086E-5

IV. ESTUDO DE CASO

Para análise das TRT o sistema elétrico foi configurado uma falta trifásica na barra 105, como pode ser visto na Figura 6. Posteriormente são verificados os níveis de correntes de curto-circuito assimétrica e simétrica, de acordo com tensão nominal aplicada na fonte (69 kV e 72,5 kV).

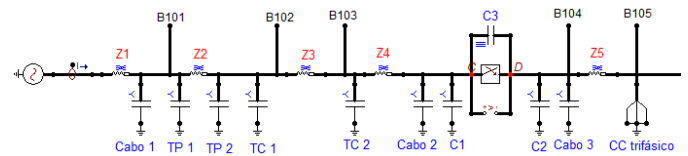


Fig. 6. Circuito simulado no Software ATPDraw

As simulações a seguir apresentam os sinais de acordo com a configuração do sistema elétrico para analisar a tensão de restabelecimento transitória no disjuntor em estudo.

A. Resultados das Simulações

1) Cenário 1 – T_{10}

Para este cenário, a tensão da fonte foi configurada em 72,5 kV. Além disso, respeitando os valores padrões de impedância do sistema teste, conforme informado pela concessionária de energia elétrica, observou-se uma TRT com amplitude de 99,8 kV como ilustra a Figura 7.

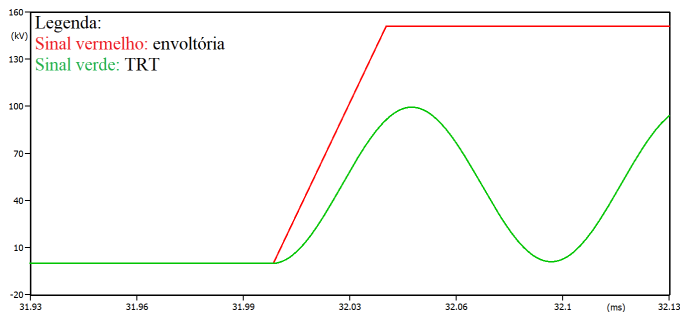


Fig. 7. Sinal de TRT obtido no ATPDraw com suprimento em 72,5 kV

A fonte de alimentação foi ainda ajustada para um nível de tensão de 69 kV. Nessa situação foi observada uma TRT de 95 kV (pico), conforme ilustra a Figura 8.

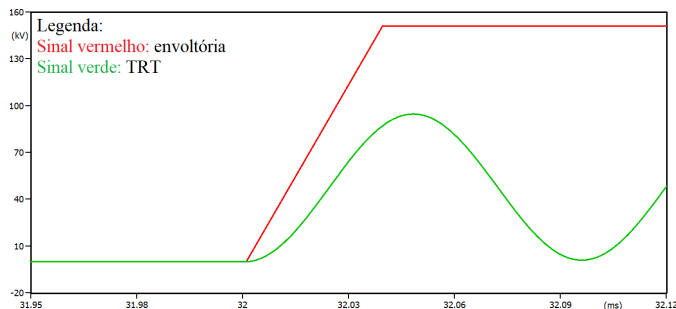


Fig. 8. Sinal de TRT obtido no ATPDraw com suprimento em 69 kV

Para as duas simulações realizadas neste primeiro cenário em regime T_{10} , não há ultrapassagem dos limites da envoltória superiores e da TCTRT definidos pelo padrão IEEE Std C37.04b-2008 (2008). Sendo assim, o disjuntor não foi superado por TRT em regime T_{10} . A Tabela IV apresenta os valores das correntes de curto-circuito trifásica para os dois casos simulados neste regime, ambas obtidas através das simulações computacionais. Além disso, percebe-se através dos valores encontrados das correntes curto-circuito são inferiores a 10% da capacidade de interrupção do disjuntor em estudo para este cenário. Isso tanto para os resultados das correntes de curto-circuito assimétricas e simétricas.

TABELA IV. VALORES DAS CORRENTES DE CURTO-CIRCUITO

Cenário	Fonte 72,5 kV		Fonte 69 kV		
	TRT	99,4 kV	TRT	95 kV	
	TCTRT	2,31 kV/ μ s	TCTRT	2,15 kV/ μ s	
T_{10}	Correntes de curto-circuito (A)				
	trifásica assimétrica 0,5 ciclos	trifásica simétrica	trifásica assimétrica 0,5 ciclos	trifásica simétrica	
	Fase A	1.450,62	1.444,68	1.380,59	1.374,89
	Fase B	1.483,48	1.444,68	1.411,81	1.374,89
	Fase C	1.459,20	1.444,68	1.361,98	1.374,89

2) Cenário 2 - T_{30}

Neste cenário assegurou-se o regime T_{30} para o disjuntor ao reduzir a impedância do equivalente de rede em 6,4 vezes, com foco na corrente de curto-circuito assimétrica na barra 105. A Figura 9 apresenta o primeiro caso deste cenário, onde a fonte foi configurada para um nível de tensão nominal de 72,5 kV. E o resultado computacional, demonstrou que o valor máximo da TRT chegou a 100 kV.

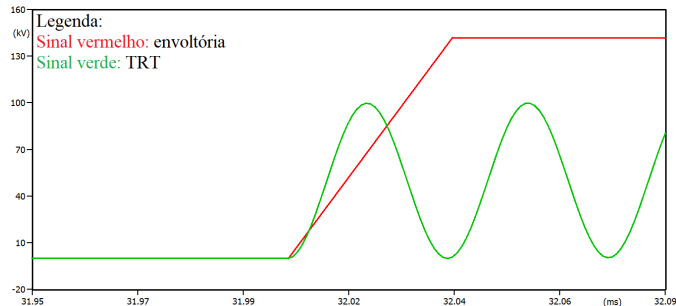


Fig. 9. Sinal de TRT obtido no ATPDraw com suprimento em 72,5 kV

Para este segundo caso, a fonte foi alterada para um nível de tensão nominal de 69 kV. Ademais, a simulação evidenciou que o valor de pico da TRT chegou a 95 kV conforme apresenta a Figura 10.

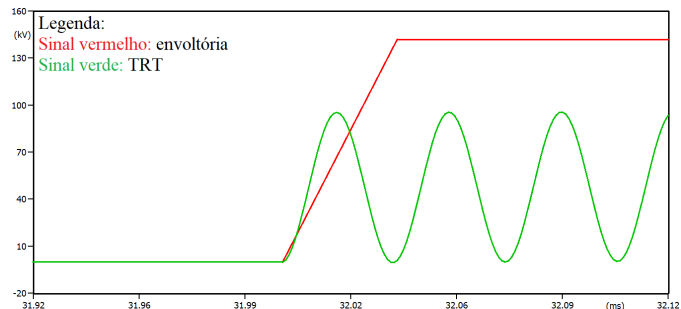


Fig. 10. Sinal de TRT obtido no ATPDraw com suprimento em 69 kV

As simulações evidenciaram que o disjuntor foi superado nos dois casos deste cenário em regime T_{30} . Em ambas houve ultrapassagens dos limites pela TCTRT definido pela norma IEEE Std C37.06-2009 (2009). A Tabela V ilustra os valores das correntes de curto-circuito para esta configuração do sistema.

TABELA V. VALORES DAS CORRENTES DE CURTO-CIRCUITO

Cenário	Fonte 72,5 kV		Fonte 69 kV		
	TRT	99,7 kV	TRT	95,3 kV	
	TCTRT	5,86 kV/ μ s	TCTRT	5,6 kV/ μ s	
T_{30}	Correntes de curto-circuito (A)				
	trifásica assimétrica 0,5 ciclos	trifásica simétrica	trifásica assimétrica 0,5 ciclos	trifásica simétrica	
	Fase A	9.139,50	9.077,83	8.706,97	8.647,20
	Fase B	9.356,18	9.077,83	8.913,86	8.647,20
	Fase C	9.157,48	9.077,83	8.722,74	8.647,20

3) Cenário 3 – T_{60}

Para este cenário, o sistema elétrico foi configurado para um regime T_{60} . A corrente de curto-circuito assimétrica trifásica na barra 105 deve ficar próxima a 60% da capacidade de interrupção do disjuntor. Isso foi possível ao reduzir a impedância equivalente da fonte em 12,9 vezes. A Figura 11 mostra o valor de pico da TRT em 101 kV para uma tensão nominal na fonte de 72,5 kV.

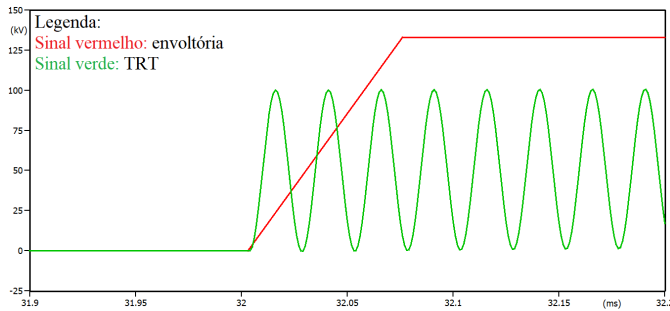


Fig. 11. Sinal de TRT obtido no ATPDraw com suprimento em 72,5 kV

Para o segundo caso, a tensão nominal da fonte foi ajustada em 69 kV e o valor de pico da TRT chegou a 95,7 kV, conforme Figura 12.

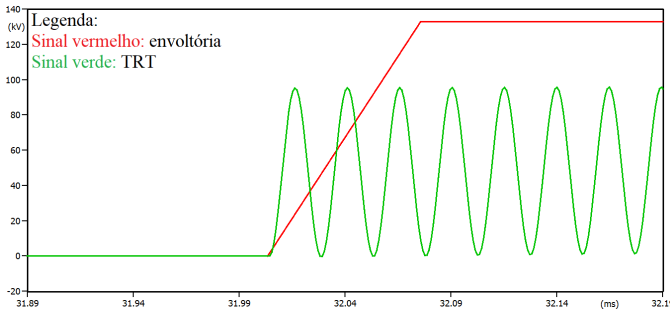


Fig. 12. Sinal de TRT obtido no ATPDraw com suprimento em 69 kV

Para as duas simulações em regime T_{60} , o disjuntor foi superado por TRT ultrapassando os limites da envoltória especificado pelo padrão IEEE Std C37.011-2011 (2011). A Tabela VI ilustra os valores das correntes de curto-circuito trifásica para esta configuração do sistema elétrico.

TABELA VI. VALORES DAS CORRENTES DE CURTO-CIRCUITO

Cenário	Fonte 72,5 kV		Fonte 69 kV	
	TRT	106,1 kV	TRT	101 kV
	TCTRT	15,15 kV/μs	TCTRT	14,42 kV/μs
	Correntes de curto-circuito (A)			
T_{60}	trifásica assimétrica 0,5 ciclos	trifásica simétrica	trifásica assimétric a 0,5 ciclos	trifásica simétrica
Fase A	18.406,41	18.272,34	17.518,17	17.390,58
Fase B	18.844,02	18.272,34	17.934,65	17.390,58
Fase C	18.427,80	18.272,34	17.588,55	17.390,58

4) Cenário 4 – T_{100}

Para esta análise o disjuntor em estudo foi submetido a valores máximos de suportabilidade da corrente de curto-circuito. Para que o disjuntor esteja em regime T_{100} , a impedância equivalente da fonte foi reduzida 21,55 vezes. A Figura 13 apresenta o sinal da TRT em um nível de tensão na ajustada em 72,5 kV. A simulação demonstrou o valor máximo da TRT se aproximando a 101 kV.

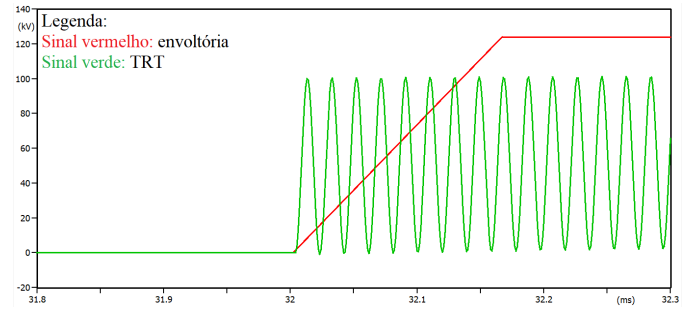


Fig. 13. Sinal de TRT obtido no ATPDraw com suprimento em 72,5 kV

Para o segundo caso deste cenário, a fonte foi alterada para 69 kV. A Figura 14 mostra que o valor máximo de TRT chegou a 96 kV.

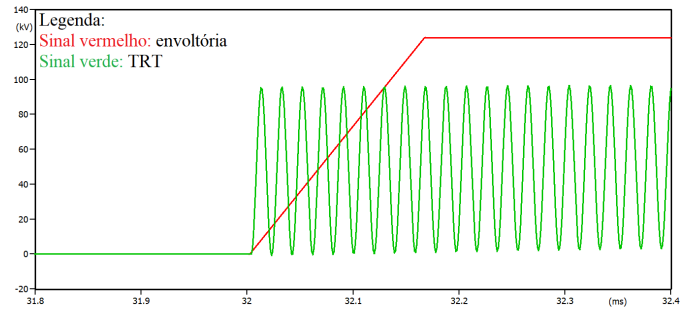


Fig. 14. Sinal de TRT obtido no ATPDraw com suprimento em 69 kV

Para as simulações realizadas neste quarto cenário, o disjuntor foi superado nos dois casos em regime T_{100} . A superação do disjuntor ocorreu através da inclinação da envoltória definida pela norma IEEE Std C37.06-2009 (2009). A Tabela VII ilustra os valores das correntes de curto-circuito para esta configuração do sistema elétrico.

TABELA VII. VALORES DAS CORRENTES DE CURTO-CIRCUITO

Cenário	Fonte 72,5 kV		Fonte 69 kV	
	TRT	100 kV	TRT	96 kV
	TCTRT	11,11kV/μs	TCTRT	10,56 kV/μs
	Correntes de curto-circuito (A)			
T_{100}	trifásica assimétrica 0,5 ciclos	trifásica simétrica	trifásica assimétrica 0,5 ciclos	trifásica simétrica
Fase A	30.758,75	30.530,04	29.272,69	29.055,01
Fase B	31.488,67	30.530,04	29.968,14	29.055,01
Fase C	30.786,84	30.530,04	29.299,63	29.055,01

V. CONCLUSÕES

O presente trabalho abordou o tema de análise de superação TRT em disjuntores. Foi realizado um estudo de um sistema teste baseado em dados reais. Com base nos resultados obtidos através das simulações, pode-se garantir que o disjuntor em estudo de caso não corre risco de ser superado por TRT desde que mantidas as características atuais do sistema elétrico (Cenário 1 – T₁₀).

Se as características da rede elétrica que está conectada a este disjuntor forem alteradas, o disjuntor será superado para as condições propostas no segundo, terceiro e quarto cenários. Isso pode ocorrer por diferentes motivos, tais como a inclusão de novas linhas em paralelo ou manobras emergenciais. Nesses casos, há a elevação do nível de corrente de curto-circuito mudando o regime para T₃₀, T₆₀ ou T₁₀₀. Para essas condições de regime, o equipamento será superado pela TCTRT conforme sistema simulado. Em qualquer regime onde o disjuntor esteja superado, recomenda-se que seja feita uma análise de TRT adequada antes de substituí-lo para evitar custos elevados.

Este trabalho reforça a necessidade de estudo de superação TRT em disjuntores durante a fase de projeto de uma subestação.

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] ONS, “Nota Técnica N° 48/2014: Critérios para Análise de Superação de Equipamentos e Instalações de Alta Tensão.” 2014.
- [2] R. Rifaat, T. S. and Lally, and J. Hong, “Circuit Breaker Transient Recovery Voltage Requirements for Medium-Voltage Systems With NRG,” *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 50, no. 5, pp. 2989–2995, 2014.
- [3] D. and Dufournet and J. Hu, “Revision of IEEE C37.011 Guide for the Application of Transient Recovery Voltages for AC High-Voltage Circuit Breakers,” *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2012.
- [4] M. Malekpour, A. Pouramin, A. Malekpour, T. Phung, and E. Ambikairajah1, “Monitoring and measurement of highfrequency oscillatory transient recovery voltage of circuit breakers,” *IET Sci. Meas. Technol.*, vol. 12, no. 6, pp. 764–769, 2018.
- [5] IEEE Std C37.011, “IEEE Guide for the Application of Transient Recovery Voltage For AC High-Voltage Circuit Breakers.” IEEE Power & Energy Society, New York, 2011.
- [6] G. S. Salge, P. S. P. Junior, M. J. B. B. Davi, C. M. Martins, P. S. Pereira, and G. E. Lorenço, “Investigação das Tensões de Restabelecimento Transitórias (TRT) Experimentadas por Disjuntores de Alta Tensão e Estudo de Métodos Mitigadores,” in *XVIII ERIAC*, 2019, pp. 1–8.
- [7] D. L. Swindler, P. Schwartz, P. S. Hamer, and S. R. Lambert, “Transient recovery voltage considerations in the application of medium voltage circuit breakers.,” *Record of Conference Papers - Annual Petroleum and Chemical Industry Conference*, vol. 33, no. 2, pp. 77–82, 1995.
- [8] IEEE Std C37.04b, “Amendment 2: To Change the Description of Transient Recovery Voltage for Harmonization with IEC 62271-100.” IEEE Power & Energy Society, New York, 2008.
- [9] IEEE Std C37.06, “IEEE Standard for AC High-Voltage Circuit Breakers Rated on a Symmetrical Current Basis-Preferred ratings and Related Required Capabilities for Voltages Above 1000 V.” New York, 2009.