

Análise do Risco de Falha Associado a Métodos de Controle de Sobretensões de Energização em Linhas de Transmissão Compactas

Renato V. Oliveira* . Ivan J.S. Lopes* . Alberto De Conti*

* Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica
Universidade Federal de Minas Gerais
Av. Antônio Carlos 6627, 31270-901, Belo Horizonte, MG, Brasil
(e-mails: renatovale.bhz@hotmail.com, ivan@cpdee.ufmg.br, conti@cpdee.ufmg.br)

Abstract: This paper analyses the risk of failure associated with control methods for overvoltages due to compact transmission-line (CTL) energization. The Approximate Statistical Insulation Coordination Method is applied different control methods to verify which will be very suitable for long CTL. The results are analyzed according to different devices and configurations using pre-insertion resistor, controlled switching and, transmission-line surge arrester. The software ATPDraw was used to obtain the results, where the High-Voltage (HV) systems in 500 kV with statistical switching were modeled. The results show that the smaller risks of failure are obtained with pre-insertion resistor associated with controlled switching, significantly decreasing the line-to-ground overvoltages of the CTL. Furthermore, this paper shows a study about increasing of the risk of failure associated to reduction of the insulation spacing in CTL.

Resumo: Este artigo analisa riscos de falha associados aos métodos de controle de sobretensões para energização em linhas de transmissão compactas (LTC). O Método de Coordenação de Isolamento Estatístico Aproximado é aplicado, comparando-se os diversos métodos de controle de sobretensões visando determinar qual destes é mais adequado para LTC longas. São analisadas várias configurações utilizando resistor de pré-inserção, fechamento síncrono de disjuntores e, para-raios de ZnO. Para tal, utilizou-se o software ATPDraw, onde foram modelados sistemas de Alta Tensão em 500 kV com chaveamento estatístico em linhas de transmissão convencional e LTC. Os resultados obtidos através das simulações demonstram que os menores riscos de falha devem-se aos métodos de controle utilizando resistores de pré-inserção em conjunto ao fechamento síncrono, reduzindo significativamente as sobretensões fase-terra da LTC. Além disso, o artigo apresenta um estudo do aumento do risco de falha associado à redução das distâncias de isolamento em LTC.

Keywords: Approximate Statistical Insulation Coordination Method; Compact transmission lines; Control methods for overvoltages; Energization; Risk of failure.

Palavras-chaves: Método de coordenação de isolamento estatístico aproximado; Linhas de transmissão compactas; Métodos de controle de sobretensões; Energização; Risco de falha.

1. INTRODUÇÃO

A melhoria de desempenho e confiabilidade de linhas de transmissão (LT) envolve estudos sobre esforços elétricos, como por exemplo, energização a vazio. Tais esforços geram sobretensões indesejadas e elevadas, sendo necessário tomadas de decisão por parte do projetista que nem sempre são simples, devendo-se adequar os critérios técnicos-econômicos e de segurança. Assim, a relação custo-benefício tem interesses conflitantes entre si, segundo EPRI (1984), Greenwood (1991) e Hileman (1999).

Atualmente, a implantação de linhas de transmissão compactas (LTC) é crescente devido ao desenvolvimento de novas tecnologias e próprio interesse de concessionárias de energia. Mesmo com estruturas menores, estas podem operar em nível de tensão mais elevado se comparadas

às LT convencionais (Souza (2020)). Consequentemente, os custos serão reduzidos graças à menor quantidade de material e manutenção de torres de transmissão, além do menor corredor para transmissão de energia (Rosário (2011)). Outras vantagens de LTC são o uso em áreas com alta densidade populacional, capacidade de transmissão de potência elevada, menor poluição visual e diversidade de silhuetas das torres (Frontin (2013) e Maduro-Abreu et al. (2010)). Suas desvantagens são maior proximidade entre as fases (intensificação de campo elétrico), variedade de silhuetas (dificultando uso de normas aplicáveis a estas) e, requisitos técnicos ainda não regulamentados por normas (Souza (2020)). O principal ponto em seu uso diz respeito aos níveis de isolamento das torres devido à maior proximidade dos condutores, sendo importante análises sobre esforços elétricos resultantes nos arranjos.

As sobretensões de manobra tem grande relevância em projetos dos isolamentos para nível de tensão igual ou superior a 345 kV (Araújo e Neves (2005), Glover et al. (2012) e Mamede (2013)). Segundo Hileman (1999) e Araújo e Neves (2005), surtos de manobras dependem de vários fatores (parâmetros da LT, disjuntores, fonte de alimentação, dimensões, configuração da torre, causa do fenômeno, tempo e condição inicial do sistema). Além disso, conforme Bickford et al. (1980), existe dispersão associada ao tempo de chaveamento dos polos de disjuntores trifásicos, que junto ao acoplamento entre fases, desenvolvem sobretensões transitórias nas fases ainda não energizadas.

Assim, neste trabalho, aplica-se chaveamentos estatísticos a diferentes métodos de controle de sobretensões em energização de LTC para melhorar o seu desempenho frente a tal solicitação elétrica. Para tal, são utilizados resistor de pré-inserção (RPI), fechamento síncrono de disjuntores (FS) e para-raios de ZnO (TLSA, do termo em inglês *Transmission Line Surge Arrester*). São avaliados os métodos separadamente e em conjunto para verificar as principais respostas de cada um dos métodos sugeridos. Em seguida, é aplicado o *Método Estatístico Aproximado* para quantificar o risco de falha da LTC associado àquele dado método de controle de sobretensão. Por fim, avalia-se a relação entre o comprimento das cadeias de isoladores e os riscos de falha determinados pelos métodos de controle de sobretensões.

Para obtenção dos resultados foi utilizado o software de transitórios eletromagnéticos ATPDraw (Prikler e Høidalen (2009) e Dommel (1994)). Os resultados obtidos se mostram coerentes àqueles apresentados em Mestas e Tavares (2014), mas acrescenta-se aqui, análises de sensibilidade para cada um dos métodos de controle de sobretensões, para assim quantificar o risco de falha associado à variação do comprimento das cadeias de isoladores da LTC.

Portanto, o objetivo do artigo é analisar o risco de falha associado a diversos métodos de controle de sobretensões por energização em LTC. Tal aplicação, elabora estratégias para adequação técnico-econômico de LTC em sistemas de Alta-tensão (AT) e Extra-alta tensão (EAT), podendo-se reduzir riscos de falha e custos de implantação sem prejuízo do desempenho da LTC.

Este trabalho é apresentado na seguinte estrutura: introdução, métodos de controle, metodologia e modelagem dos sistemas, resultados e análises e, conclusão.

2. MÉTODOS DE CONTROLE DE SOBRETENSÕES

2.1 Resistor de pré-inserção

Segundo D´Ajuz et al. (1987), o uso de resistor de pré-inserção (RPI) é um dos métodos mais efetivos para redução das sobretensões provocadas por chaveamentos em LT, desde que os resistores sejam dimensionados adequadamente. No momento da energização, o RPI é conectado em série (entre a fonte e a LT). Após um período maior que duas vezes o tempo de trânsito das ondas trafegantes na LT, o RPI é retirado do sistema por meio de chaveamento paralelo a este, curto-circuitando-o (método *by-pass*). As-

sim, o RPI atua como um divisor de tensão, evitando que sobretensões ao final da LT a vazio sejam muito elevadas. Conforme D´Ajuz et al. (1987) e Glover et al. (2012), os valores de RPI são de 100 Ω a 900 Ω .

2.2 Fechamento síncrono de disjuntores trifásicos

Quando disjuntores trifásicos são conectados à LT, os polos não se fecham simultaneamente. Quando a primeira fase é energizada e, devido ao acoplamento mútuo entre as fases, sobretensões indesejadas são induzidas nas fases ainda não energizadas da LT. Segundo Bickford et al. (1980), o intervalo de tempo entre o fechamento do primeiro e último polos é próximo a 5 ms. Conforme Zanetta (2003) e Frontin (2013), atualmente existem circuitos para controle de sobretensões com mecanismos de sincronismos de fechamento de disjuntores. Em D´Ajuz et al. (1987) são apresentados dois modos para este método de controle: (i) fechar as três fases simultaneamente quando a tensão de apenas uma das fases for nula ou, (ii) fechar as três fases consecutivamente quando a tensão em cada uma das fases for nula. Neste trabalho adotou-se o método (ii).

2.3 Para-raios de linhas de transmissão

Para-raios de linhas de transmissão de óxido de zinco (ou TLSA) permitem a redução dos níveis de isolamento de equipamentos em sistemas elétricos (D´Ajuz et al. (1987)). Idealmente, o TLSA conduz apenas quando uma tensão aplicada é superior à sua tensão nominal, apresentando pequenas variações de tensão durante o surto, mesmo com grande variação da corrente drenada. Caso contrário, não há condução de corrente. Assim, o TLSA conduz por um dado período sem danos, desde que não ultrapasse sua capacidade de dissipação de energia.

A LT é o elo mais vulnerável em redes elétricas, e a fim de reduzir as sobretensões impostas à LT, utiliza-se TLSA instalados nos extremos da LT, sempre conectados em paralelo às cadeias de isoladores (Mamede (2013)). Podem também ser instalados em outros pontos da LT, em áreas com alta incidência de descargas atmosféricas e/ou regiões com solos de alta resistividade. Assim, o TLSA opera como meio condutor quando há sobretensões elevadas, evitando falhas de isolamento no sistema, tanto em surtos de manobra quanto em atmosféricos. Há várias vantagens do TLSA citadas em Cigré (2010), tais como: melhoria da proteção contra descargas atmosféricas, proteção estendida às subestações, controle de chaveamento de surto, reduções das taxas de *flashover* e *backflashover* em LTC, reduções das tensões de passo e toque e, proteção em linha viva.

3. METODOLOGIA E MODELAGEM DOS SISTEMAS

3.1 Metodologia

O estudo de sobretensões por energização de LTC deve ser realizado com aplicação de chaves estatísticas, obtendo-se curvas de distribuição de sobretensões.

Segundo Zanetta (2003), os três polos dos disjuntores trifásicos não se fecham simultaneamente devido à dispersão mecânica entre seus contatos, além do surgimento de arco elétrico estabelecido antes do encontro mecânico dos polos,

de caráter totalmente aleatório. Assim, os disjuntores trifásicos não possuem tempos bem definidos para fechamento de cada polo e nem tempos associados ao fechamento sequencial e, por isso, considera-se fator estatístico de dispersão associado ao seu uso (Bickford et al. (1980)).

Assim, neste artigo, são realizadas simulações com chaveamento estatístico, aplicando-se para tal, os métodos de controle de sobretensões apresentados na Tabela 1. Todas as simulações consideram a LT a vazia, pois segundo D’Ajuz et al. (1987) e Zanetta (2003), este é o caso que apresenta maiores sobretensões, podendo-se atingir valores superiores a 2 pu (exceto em LT com carga residual podendo chegar a 3.5 pu). Para cada caso, foram realizadas 300 simulações, sendo este o valor de mediana avaliado por Mestas e Tavares (2014). Na Tabela 1 os casos 0 (torre convencional) e 1 (torre compacta) não utilizam métodos de controle de sobretensões, para efeito de comparação.

Tabela 1. Casos simulados.

Caso	Torre	Método de Controle
0	Convencional	Nenhum
1	Compacta	Nenhum
2	Compacta	RPI
3	Compacta	FS
4	Compacta	TLSA
5	Compacta	RPI-FS
6	Compacta	RPI-TLSA
7	Compacta	FS-TLSA
8	Compacta	RPI-FS-TLSA

Os resultados das simulações foram coletados através dos arquivos .LIS gerados pelo ATPDraw. Com isso, foi possível verificar os comportamentos estatísticos das sobretensões (média e máxima), desvio-padrão, variância, frequências relativas e acumuladas. Foram elaborados gráficos e tabelas para melhor visualização dos resultados e suas análises, conforme exposto na seção *Resultados e Análises*.

Assim, é possível definir a máxima sobretensão estatística ($V_{2\%}$), que se refere ao valor de sobretensão com 2% de possibilidade de ser excedida, dada por (1),

$$V_{2\%} = V_{50}(1 + 2.054\sigma_s) \quad (1)$$

onde V_{50} é a sobretensão média e σ_s é o desvio-padrão das curvas de sobretensões de manobra.

A tensão de suportabilidade que representa 50% de probabilidade de falha é obtida por (2) para cadeias de isoladores de 1 m a 15 m,

$$U_{50} = k \frac{3400}{1 + \frac{s}{d}} \quad (2)$$

onde: U_{50} (ou CFO - *Critical Flash Overvoltage*) é a tensão de suportabilidade da isolação, d é o comprimento da cadeia de isoladores e, (k) é o fator de gap, referente à silhueta da torre de transmissão (adotado tipo condutor-janela), dada por (3),

$$k = 1.25 + 0.005 \left(\frac{H}{D} - 6 \right) + 0.25(e^{-8\frac{s}{D}} - 0.2) - 0.007(D - 5) + 0.01(N - 2) \quad (3)$$

onde D é a distância do condutor à estrutura da torre, H é a altura do condutor em relação ao solo, S é a largura da torre e N é o número de subcondutores por fase.

Com dois valores de H , são obtidos $k=1.24$ para a fase C e, $k=1.25$ para as fases A e B. Portanto, com certo conservadorismo opta-se por $k=1.25$ para todas as cadeias. Em Hileman (1999) são apresentadas as condições necessárias para aplicação de (3). O desvio-padrão (σ_d) adotado neste artigo para a curva de suportabilidade é de 6% (D’Ajuz et al. (1987) e Rosário (2011)).

Assim, aplica-se o *Método Estatístico Aproximado*, para os cálculos de riscos de falha individual (R) das cadeias de isoladores conforme (4),

$$R = \left[1 + \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^y e^{-\frac{z^2}{2}} dz \right] = \frac{1}{2} \left[1 - \operatorname{erf} \left(\frac{y}{\sqrt{2}} \right) \right], \quad (4)$$

onde:

$$y = \frac{U_{50} - V_{50}}{\sqrt{\sigma_d^2 + \sigma_s^2}}$$

e

erf = função erro de Gauss.

Com os valores de risco de falha individuais, obtém-se o risco de falha total (R_{total}) da LTC (D’Ajuz et al. (1987)), conforme (5),

$$R_{total} = 1 - (1 - R)^n, \quad (5)$$

onde n é a quantidade de torres (gaps em paralelo).

Finalmente, tem-se os riscos de falhas associados a cada um dos métodos de controle de sobretensões aplicados a este artigo. Neste trabalho considera-se surto resultante de mesma magnitude em todos os pontos das LT.

3.2 Modelagem dos Sistemas

Neste artigo considera-se duas LT (uma compacta e uma convencional) com tensão nominal de 500 kV, comprimento de 500 km, totalmente transposta, com vãos de 500 m entre as torres, totalizando 1001 torres de transmissão. A tensão de base adotada é a tensão de pico fase-terra. A Figura 1 apresenta a configuração do sistema com todos os dispositivos de controle.

Linhas de transmissão compacta e convencional. A LT é modelada pelo componente LCC (*Line/Cable Constants*) do ATPDraw. Os principais dados de entrada são a geometria da torre, parâmetros dos condutores elétricos e cabos para-raios, alturas dos condutores em relação ao solo, resistividade do solo (adotado 1000 Ω m) e efeito skin. O

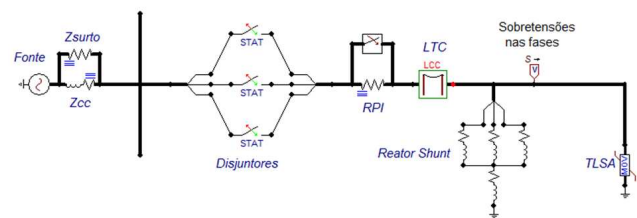


Figura 1. Sistema de potência com LTC em 500kV.

modelo de LT utilizado é JMarti (parâmetros distribuídos variáveis com a frequência), com frequência em regime permanente em 60 Hz e frequência máxima de 10 kHz, conforme sugerido em Zanetta (2003) e Souza (2020).

As configurações das torres e cabos condutores das LT (convencional e compacta) (Figuras 2 e 3) foram obtidas de Wei-Gang (2003), que realiza comparativo entre configurações em LT de 500 kV. Já na Tabela 2 são detalhados os principais parâmetros da LTC e cabos.

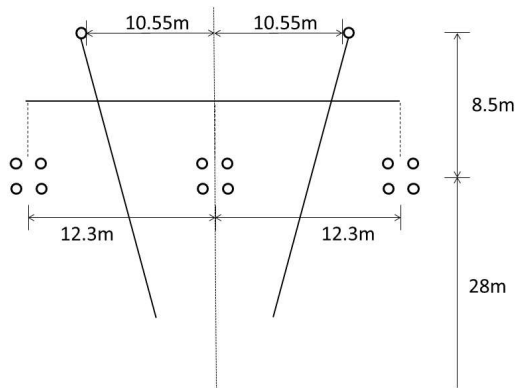


Figura 2. Configuração da torre de transmissão convencional em 500 kV. Adaptado de Wei-Gang (2003).

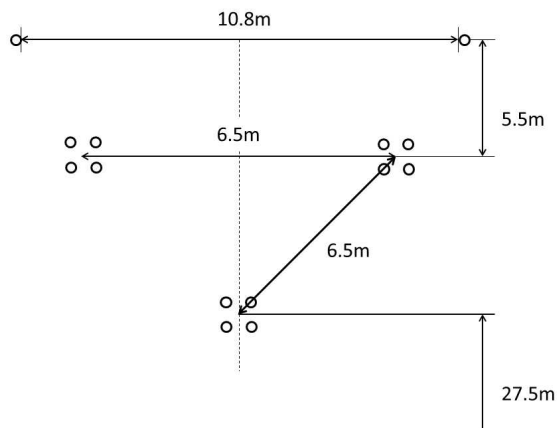


Figura 3. Configuração da torre de transmissão compacta com silhueta delta-invertido em 500 kV. Adaptado de Wei-Gang (2003).

Tabela 2. Dados da LTC ao bloco LCC.

Cabos	Fases			CPR	
	A	B	C	1	2
Tipo (condutor)	ACSR	ACSR	ACSR	GJ-70	GJ-70
N° Condutores	4	4	4	1	1
r_{in} (cm)	0.4605	0.4605	0.4605	0	0
r_{out} (cm)	1.3815	1.3815	1.3815	1.08	1.08
R (Ω /km CC)	0.0723	0.0723	0.0723	0.4226	0.4226
Horizontal (m)	-3.25	0	3.25	-5.40	5.40
Vertical (m)	33.13	33.13	27.50	38.63	38.63

Condutores comumente utilizados em LT em AT são ACSR (alumínio com alma de aço), com dados obtidos de catálogos de fabricantes. Seguindo Wei-Gang (2003), utilizou-se condutores 4xLGJ-400/35 (LT convencional), 4xLGJ-400/50 (LTC) e GJ-70 (cabo para-raios).

Foram adotados os seguintes valores apresentados em (3): distância do condutor à estrutura da torre (D) em 4.00 m ou 3.75 m ou 3.50 m, altura do condutor em relação ao solo (H) em 27.5 m para a fase mais baixa da torre (fase C) e 33.13 m para as demais fases (fases A e B), largura da torre (S) de 2 m e, 4 subcondutores/fase (N).

Fonte de alimentação. A fonte de tensão é trifásica e simétrica com tensão de linha em 500 kV, frequência em 60 Hz, operando em regime permanente. Em série com a fonte é colocada uma impedância de curto-circuito (componente RLC3). Utilizou-se valor típico conforme ATP-Draw, D'Ájuz et al. (1987) e Prikler e Høidalen (2009). Em Martinez-Velasco (2015) explica-se a relação do ângulo de amortecimento desta impedância, dada pela razão entre a resistência e a reatância, que deve ser entre 75° e 85° . Assim, adotou-se $R = 5 \Omega$ e $L = 75$ mH, obtendo um ângulo final de 80° . Paralelo à esta impedância, é conectada uma impedância de surto de 200Ω . Segundo Martinez-Velasco (2015), esse valor modela possíveis LT conectadas ao barramento da subestação e, portanto, supõe-se duas LT conectadas em paralelo, sendo a impedância de cada uma delas de 400Ω .

Disjuntores trifásicos. A modelagem aqui é dividida em duas partes utilizando chaves estatísticas independentes. A primeira, não considera o controle de fechamento do disjuntor, adotando-se tempo médio de 13 ms e desvio-padrão de 1 ms. Em Mestas e Tavares (2014) é abordado que tais tempos possibilitam chaveamento em ampla faixa de um ciclo completo da onda de tensão, sendo suficientes para atuação arbitrária dos disjuntores. No ATPDraw é necessário definir o parâmetro $ITEST = 0$ neste caso. A segunda parte, considera controle de fechamento síncrono, onde as menores sobretensões ocorrem quando as tensões de fase são próximas a 0 V (D'Ájuz et al. (1987)). Assim, os tempos médios adotados são 4.17 ms, 9.72 ms e 15.28 ms referente a cada uma das fases, com desvio-padrão de 1 ms. Para limitar estes tempos utiliza-se o parâmetro $ITEST = 1$ no ATPDraw.

Compensação shunt. Em simulações iniciais, verificou-se presença de *Efeito Ferranti* na LT, elevando a tensão sustentada na extremidade aberta da LT a valores superiores à tensão do lado da geração (Araújo e Neves (2005)). Assim, a tensão em regime permanente estava acima do máximo permitido em LT de 500 kV, que segundo ONS (2011) é de 1.1 pu. LT em AT ou EAT com comprimento superior a 300 km, precisam de compensação reativa, usando assim reatores shunt indutivos conectados ao final para anular a admitância capacitiva produzida pela própria LT (Martinez-Velasco (2015) e Zanetta (2006)). Desta forma, utilizou-se compensação reativa de 80% para minimização do efeito Ferranti, adotando-se o modelo de quadripolos para obtenção do valor da reatância do compensador, conforme apresentado em Zanetta (2006) e Moura et al. (2019). Para tal, os parâmetros de sequências positiva e zero para modelagem do reator indutivo

são obtidos no ATPDraw pela função *LINE CHECK*. Assim, tem-se as impedâncias série de sequência positiva $Z_+ = 0.0193 + j0.2628$ e zero $Z_0 = 0.2679 + j0.8904$ dadas em $[\Omega/\text{km}]$ e, admitância shunt paralela de sequência positiva $Y_+ = 0.021 + j16.3$ e zero $Y_0 = -0.009 + j7.2963$ dadas em $[\text{nF}/\text{km}]$.

Resistor de pré-inserção (RPI). Para o RPI adotou-se o valor de 325Ω , conforme IEEE (1993). Considerando a retirada do RPI do sistema para fechamento assíncrono, adotou-se 30 ms para o *by-pass*, sendo este definido pelo instante de fechamento da última chave para energização (aproximadamente 25 ms) mais o dobro do tempo de trânsito da LT (1.67 ms). Já para o fechamento síncrono, adotou-se o tempo médio de fechamento da última chave (15.28 ms), não sendo necessário neste caso aguardar até 30 ms como no caso anterior, pois o tempo de contato do último polo é menor. Por isso, adotou-se 23 ms.

Para-raios de linhas de transmissão (TLSA). Com base em dados obtidos de catálogos de fabricantes de TLSA (Siemens (2011)) adotou-se o modelo 3EL2 420-6LM43 com tensão nominal de 420 kV. A opção pelo modelo deve-se à corrente de descargas atmosféricas de 20 kA, típicas para este nível de tensão (Zanetta (2003)). Assim, a curva *Vxi* do TLSA é apresentada na Tabela 3.

Tabela 3. Curva *Vxi* do TLSA, parcialmente obtida de Siemens (2011).

V (kV)	i (A)
429	0.0005
594	0.002
650	10
820	1000
877	2000
897	3000
948	5000
1109	20000

4. RESULTADOS E ANÁLISES

Os valores de sobretensões médias e máximas estatísticas obtidos são apresentados a seguir. As análises são realizadas apresentando os resultados obtidos de riscos de falha para cada um dos métodos de controle seguida da avaliação da influência da variação dos comprimentos das cadeias de isoladores das torres de transmissão de LTC.

A Tabela 4 apresenta os resultados de sobretensões e medidas de dispersão, onde: V_{50} é a média da maior sobretensão entre todas as fases (Hileman (1999)), *Redução V_{50} (%)* é a redução percentual para o método de controle utilizado em relação ao caso sem controle de sobretensão, σ_S é o desvio-padrão da distribuição, *CV* é o coeficiente de variação (relação do desvio-padrão pela média), $V_{2\%}$ é a máxima sobretensão estatística e, *Redução $V_{2\%}$ (%)* é a redução percentual para $V_{2\%}$. Já a Figura 4 apresenta graficamente as sobretensões médias e máximas estatísticas para cada um dos métodos.

Verifica-se pelos casos sem controle de sobretensões que a tensão média e máxima estatística são superiores em LT convencionais. Além disto, a convencional apresenta desvio-padrão e coeficiente de variação superiores, tendo

Tabela 4. Sobretensões e parâmetros de dispersão obtidos via simulações em ATPDraw.

Caso	V_{50} (pu)	Redução V_{50} (%)	σ_S (%)	CV (%)	$V_{2\%}$ (pu)	Redução $V_{2\%}$ (%)
0	1.97	-	13.11	6.64	2.50	-
1	1.93	-	10.60	5.50	2.35	-
2	1.52	21.27	7.67	5.05	1.76	25.11
3	1.59	17.64	13.65	8.60	2.03	13.62
4	1.81	6.17	5.20	2.87	2.00	14.89
5	1.53	20.85	0.95	0.62	1.56	33.62
6	1.52	21.11	7.19	4.73	1.75	25.53
7	1.57	18.72	12.32	7.86	1.96	16.60
8	1.53	20.85	0.86	0.56	1.55	34.26

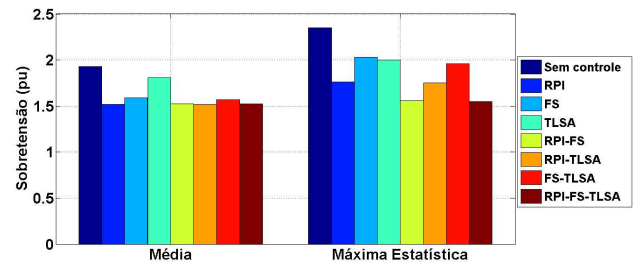


Figura 4. Sobretensões média e máxima estatística utilizando métodos de controle.

assim uma dispersão de sobretensões elevadas se comparadas à LTC. Para a LT convencional tem-se sobretensões médias de 1.97 pu frente a 1.93 pu para a LTC. Já para a máxima sobretensão estatística tem-se 2.50 pu para a LT convencional e 2.35 pu para a LTC. Além disso, o desvio-padrão e o coeficiente de variação são bem maiores para a LT convencional com valores de 13.11% e 6.64%, respectivamente. Isso pode gerar certa dificuldade no controle de sobretensão devido à ampla faixa que àquela LT estará sujeita mediante chaveamento de energização com maiores índices de risco de falha visto a maior dispersão de suas sobretensões.

Como intuito de observação do comportamento da LTC frente à LT convencional, observa-se na Tabela 4 e Figura 4, que há importantes reduções das sobretensões médias fase-terra quando aplicados métodos de controle. Assim, sem controle, tem-se sobretensão média de 1.93 pu com redução para valores próximos de 1.50 pu e 1.80 pu com uso de métodos de controle. Essa grande redução é importante em projetos de LTC, visto o interesse em obter menores dimensões das torres de transmissão. Em valores percentuais, dos sete casos com métodos de controle, seis deles apresentaram reduções entre 18% a 21% (138 kV a 167 kV). Apenas o TLSA apresentou uma redução inferior aos demais métodos (próximo a 6% - 49 kV), mas que também não deixa de ser interessante, conforme será apresentado mais a frente nas discussões de resultados.

Em valores absolutos das máximas sobretensões estatísticas, a aplicação de LTC sem método de controle apresenta 2.35 pu, sendo que métodos de controle mais efetivos conseguem gerar valores entre 1.55 pu a 2.03 pu, sendo outra característica interessante a se observar. Em valores percentuais, estas reduções variam entre 14% a 34% (130 kV a 327 kV). Com as reduções das máximas sobretensões estatísticas, ou seja, o deslocamento à esquerda das curvas estatísticas de sobretensões, haverá consequentemente re-

duções de riscos de falha para o sistema, considerando-se a mesma curva de suportabilidade, sendo isso analisado mais a frente nesta mesma seção. Deve-se ressaltar que apenas as análises das sobretensões médias e máximas estatísticas não são suficientes para determinar qual(is) o(s) melhor(es) método(s) de controle de sobretensão. Além disso, observa-se sobretensões médias muito próximas entre si para todos os métodos de controle utilizados, com exceção ao TLSA (redução de 50 kV).

Para o desvio-padrão (σ_S) e coeficiente de variação (CV), há menores dispersões no método RPI-FS e, no método TLSA-RPI-FS, sendo inferiores a 1%. Isso indica que a curva de distribuição possui dispersão muito baixa sendo muito próxima aos valores das sobretensões médias dos métodos de controle aplicados. Isto é corroborado na Figura 4, onde a dispersão reduzida produz valores de sobretensões média e máxima estatística muito próximas entre si. Do contrário, pode-se verificar que os métodos FS-TLSA e FS apresentam valores de σ_S elevados (12% a 14%), assim como seu coeficiente de variação (7.86% a 8.60%), fazendo com que suas curvas de distribuição tenham ampla faixa de sobretensões resultantes passíveis de ocorrência.

Para ilustrar a discussão das sobretensões associadas às suas medidas de dispersão, a Figura 5 apresenta alguns dos histogramas e curvas de distribuição de sobretensões para a LTC sem método de controle e com métodos de controle de sobretensões (RPI, TLSA e RPI-FS). Aplicando-se quaisquer dos métodos de controle, e servindo como base o sem controle, é possível observar seu deslocamento para o lado esquerdo do gráfico, representando assim reduções de sobretensões médias proporcionadas pelos métodos de controle adotados. Ainda, na Figura 5 os histogramas representam as sobretensões agrupadas para os métodos de controle onde, as curvas mais largas possuem valores mais elevados de σ_S e CV , representando ampla dispersão de sobretensões. Ao contrário da maioria, a curva de distribuição do método RPI-FS é muito estreita e seu histograma apresenta sobretensões bastante concentradas em torno da sobretensão média. Consequentemente, possui menor σ_S e CV e, possivelmente apresentará menor risco de falha, limitando a área da superposição das curvas dos esforços elétricos e de suportabilidade com o método TLSA.

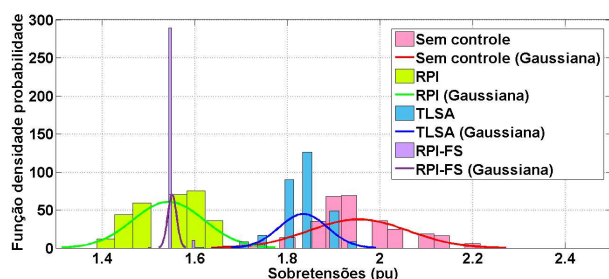


Figura 5. Função densidade de probabilidade utilizando métodos de controle de sobretensões fase-terra.

Partindo para análise gráfica de todos os métodos de controle de sobretensões, tem-se a Figura 6. Nela, verifica-se similaridades entre alguns casos, como por exemplo, a curva RPI com a curva RPI-TLSA, e a curva RPI-FS com a curva RPI-FS-TLSA. Desta forma, foi elaborada a

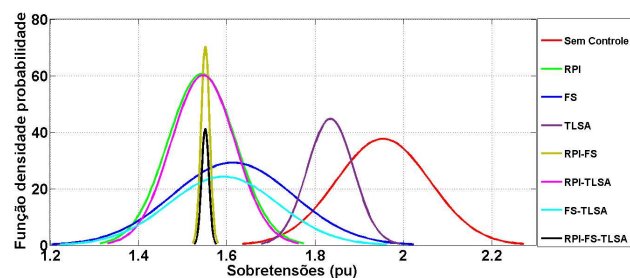


Figura 6. Funções densidade de probabilidades utilizando todos os casos de métodos de controle de sobretensões.

Tabela 5 para verificar os riscos de falhas calculados para cada um dos métodos de controle, variando-se também o comprimento das cadeias de isoladores (4.00 m, 3.75 m e 3.50 m).

Deve-se ter em mente que na falha de qualquer uma das cadeias de isoladores da LT, haverá consequente falha do sistema, independente da torre faltosa, devido ao paralelismo das mesmas. Por isso, deve-se levar em consideração a análise elaborada com os resultados obtidos por (5) e, comparados ao valor sugerido por norma. Em ONS (2011) e D’Ajuz et al. (1987) é apresentado valor de 10^{-3} para risco de falha fase-terra em manobras de energizações de LT. Tal valor indica que há possibilidade de uma falha a cada 1000 manobras de energizações realizadas. Assim, a Tabela 5 mostra que todos os casos com métodos de controle de sobretensões aplicados, apresentam riscos de falha bem menores do que estabelecido por norma e, por isso, tornam-se possíveis alternativas para reduções de sobretensões.

Considerando o método sem controle e variando-se o comprimento da cadeia de isoladores, observa-se que apenas para 4 m o risco de falha não é extrapolado, com 1 falha/4000 manobras. Este valor já seria suficiente para atender as normas porém, será verificada uma redução muito mais acentuada com os métodos de controle. Já para 3.75 m e 3.5 m os riscos de falha são superiores ao sugerido por norma e, portanto, a aplicação de métodos de controle de sobretensões deve ser aplicado obrigatoriamente.

Partindo-se para análise dos casos com métodos de controle, observa-se grande distinção entre os valores obtidos de riscos de falha para cada um deles, sendo o maior de 1 falha/1.3 milhões de manobras e a menor com probabilidade nula de ocorrência. Esse valor nulo indica que a dispersão reduzida do método RPI-FS, como também

Tabela 5. Risco de falha associado às variações dos comprimentos das cadeias de isoladores.

Caso	Redução $V_{2\%}$ (%)	R_{total} ($d=4.00$ m)	R_{total} ($d=3.75$ m)	R_{total} ($d=3.50$ m)
1	-	2.49×10^{-4}	1.78×10^{-3}	1.29×10^{-2}
2	25.11	6.67×10^{-13}	1.00×10^{-11}	1.95×10^{-10}
3	13.62	7.76×10^{-7}	6.74×10^{-6}	6.24×10^{-5}
4	14.89	7.86×10^{-10}	1.20×10^{-8}	2.15×10^{-7}
5	33.62	0	0	0
6	25.53	3.33×10^{-13}	4.00×10^{-12}	8.60×10^{-11}
7	16.60	4.28×10^{-8}	4.44×10^{-7}	5.04×10^{-6}
8	34.26	0	0	0

para o método RPI-FS-TLSA, leva à não intercessão entre as curvas de esforços elétricos e de suportabilidade. Neste caso, os métodos mais efetivos são os métodos com RPI-FS, como também, o método RPI-FS-TLSA, por não apresentarem probabilidade de risco de falha no sistema.

Se comparados apenas os casos com riscos de falha não nulos e comprimento da cadeia de isoladores em 4 m, o maior risco é do método FS, que tem mais de duas milhões de vezes o risco de falha do método RPI-TLSA, que possui o menor destes. Se considerar a menor razão entre todos os riscos de falhas dos valores expostos na Tabela 5 para 4 m, tem-se a razão de 18. Ou seja, a relação tem ampla faixa de variação, desde 18 a 2 milhões de vezes maior que o menor risco de falha não nulo.

Da mesma forma, pode-se realizar esta variação para as distâncias de 3.75 m e 3.50 m. Observa-se que não há mudança com relação aos casos indicados como menor e maior risco de falha não nulos se comparados a análise anterior. Porém, para comprimento de 3.75 m, as relações dos riscos de falha alteram de 15 a 1.6 milhões de vezes maior que o menor risco de falha. Já para o comprimento de 3.50 m, há relações de riscos de falha de 12 a 725 mil vezes maior que o menor risco de falha não nulo. Ou seja, esta relação é reduzida a medida que os comprimentos das cadeias de isoladores são reduzidos, conforme previamente esperado.

Em análise geral, conforme Figura 6 e Tabela 5, considerando as curvas estatísticas e riscos de falha (independente do comprimento da cadeia de isoladores), entre o método RPI e o método RPI-TLSA, a primeira opção apresenta resultados muito próximos aos do segundo método, mesmo sem a presença do TLSA. A mesma análise é realizada entre o método RPI-FS e o método RPI-FS-TLSA por terem valores e características praticamente idênticas entre si, mas sem a presença do TLSA, assim como ocorreu na análise anterior.

Portanto, dentre os melhores resultados dos métodos de controle propostos, observa-se sempre a presença do RPI, sendo que o TLSA seria um dispositivo intermediário de melhoria e, neste caso o fechamento síncrono é o menos efetivo.

Com os resultados da Tabela 5, tem-se a Figura 7 que mostra a relação dos riscos de falha devido à variação do comprimento das cadeias de isoladores. Além disso, faz-se um paralelo desta relação com a redução da máxima sobretensão estatística. Para facilitar a compreensão, o eixo do risco de falha é apresentado em escala logarítmica

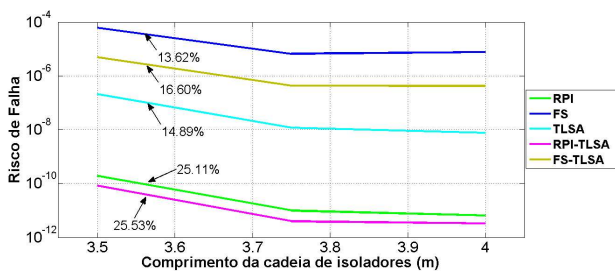


Figura 7. Risco de falha para variação do comprimento das cadeias de isoladores.

e, são apresentados apenas os casos de risco de falha não-nulos.

Observa-se que à medida que o comprimento da cadeia de isoladores aumenta, o risco de falha é reduzido significativamente em grande escala. Isto é claramente observado quando altera-se o comprimento da cadeia de 3.50 m para 3.75 m. As análises do método FS e do método TLSA ilustram o que ocorre com o risco de falha se modificado o comprimento da cadeia de isoladores. Respectivamente, tais casos apresentam variações de riscos de falha de aproximadamente 10^{-7} para valor próximo a 10^{-5} e, de 10^{-10} para valor próximo a 10^{-7} . Assim, a variação de 0.50 m do comprimento da cadeia em LTC eleva o risco de falha de cem a mil vezes, dependendo do método de controle adotado. Portanto, verifica-se que uma redução, mesmo que pequena no comprimento das cadeias de isoladores, aumenta consideravelmente os riscos de falha em escalas de centenas a milhares de vezes.

Também é observado que à medida que a redução percentual cresce, o risco de falha associado também é reduzido drasticamente. Pela Figura 7, observa-se que os maiores riscos de falha são para os métodos de controle que possuem os menores índices de redução das máximas sobretensões estatísticas. Conforme a redução cresce, a probabilidade de ocorrência de descarga diminui, pois a curva de esforços elétricos estará presente em menores valores de sobretensões e assim, a intercessão da área entre as curvas de esforços e de suportabilidade diminuirá. É observada na Figura 7 que o método FS possui a menor redução e consequentemente o maior risco de falha. Já o método RPI-TLSA possui a maior redução e menor risco de falha associado. O TLSA apresenta menor redução que o método FS-TLSA e também menor risco de falha, porém justifica-se tal comportamento pela grande diferença dos desvios-padrão entre ambos (5% e 12% respectivamente).

Verifica-se que aplicações de métodos de controle de sobretensões em LTC trazem benefícios para seu desempenho pois a redução das estruturas das torres de transmissão, podem reduzir significativamente os custos para as concessionárias e para os consumidores finais. Assim, cabe ao projetista analisar as sobretensões resultantes frente os riscos de falha que se apresentaram muito menores que aquele sugerido por norma, podendo ajustar seu grau de interesse em relação aos custos de projeto.

5. CONCLUSÃO

Neste artigo, para as linhas de transmissão analisadas, verificou-se riscos de falha muito inferiores aos sugeridos por normas, sendo obtidos pelo uso de métodos de controle de sobretensões ora propostos. Dentre os métodos, destaca-se o uso de resistor de pré-inserção que está presente nos menores riscos de falhas alcançados neste artigo, atuando sozinho ou com algum dos outros dispositivos (disjuntores com fechamento síncrono e para-raios de linhas de transmissão). Pode-se afirmar que o para-raios de linha de transmissão é o dispositivo intermediário frente aos resultados obtidos e, que o disjuntor com fechamento síncrono se mostrou menos efetivo. Porém, não deve-se excluir a possibilidade de uso de nenhum destes dispositivos pois

todos levam à redução significativa de sobretensões e riscos de falha da linha de transmissão compacta.

Para o caso estudado, observou-se resultados muito similares (sobretensões e riscos de falha) entre os métodos aplicados ao método resistor de pré-inserção e fechamento síncrono e, método com todos os dispositivos. Neles, são obtidos riscos de falha nulo, ou seja, sem probabilidade de ocorrência de descarga disruptiva. O mesmo é observado para o método resistor de pré-inserção e, método resistor de pré-inserção e para-raios de linhas de transmissão, porém com riscos de falha muito reduzidos.

Adicionalmente, verificou-se que uma pequena redução do comprimento da cadeia de isoladores provoca aumentos significativos dos riscos de falha, elevando-os na ordem de centenas a milhares de vezes. Como exemplo, o método de controle para-raios de linha de transmissão, houve um aumento de mil vezes o risco de falha, para uma redução de 0.50 m do comprimento da cadeia de isoladores. Este ponto deve ser observado com um planejamento adequado para evitar interrupção do fornecimento de energia e danos aos dispositivos/componentes. Portanto, fica claro que cabe ao projetista verificar a viabilidade técnico-econômica para reduzir os custos de implantação sem prejudicar os requisitos de desempenho da linha.

Este estudo abordou inicialmente algumas das possibilidades de controle de sobretensões visando reduções de riscos de falhas em linhas de transmissão compactas. Com isso, objetiva-se nos próximos trabalhos desenvolver estudos acerca de estudos de sobretensões e risco de falha entre fases de linhas de transmissão compactas, além de possibilidade de aplicar otimização em problemas práticos, melhorando a relação custo-benefício de projetos de linha.

AGRADECIMENTOS

O presente trabalho foi realizado com o apoio financeiro da CAPES - Brasil.

REFERÊNCIAS

- Araújo, A. e Neves, W. (2005). *Cálculo de transitórios eletromagnéticos em sistemas de energia*. Ed.UFMG, Belo Horizonte.
- Bickford, J., Mullineux, N., e Reed, J.R. (1980). *Computation of power system transients*. The Institution of Electrical Engineers, London and New York.
- Cigré (2010). *Use of surge arresters for lightning protection of transmission lines*. Cigré, Technical Brochures: Working Group C4.301, ISBN 978-2-85873-128-2.
- Dommel, H.V. (1994). *Electro-magnetic transients program (EMTP) - theory book*. Bonneville Power Administration (BPA), Portland.
- D'Ajuz, A., Fonseca, C., Carvalho, F.M., Filho, J.A., Dias, L.E., Pereira, M.P., Esmeraldo, P.C., Vaisman, R., e Frontin, S. (1987). *Transitórios elétricos e coordenação de isolamento - Aplicação em sistemas de potência de alta-tensão*. EDUFF, Rio de Janeiro.
- EPRI (1984). *Transmission line reference book, 345 kV and above*. Electric Power Research International, Palo Alto, 2ª edição.
- Frontin, S.O. (2013). *Equipamentos de alta tensão: prospecção e hierarquização de inovações tecnológicas*. Goya Editora, Brasília, 1ª edição.
- Glover, J., Sarma, M., e Overbye, T. (2012). *Power system analysis and design*. Cengage Learning, Stamford, 5ª edição.
- Greenwood, A. (1991). *Electrical transients in power systems*. John Wiley & Sons, 2ª edição.
- Hileman, A.R. (1999). *Insulation coordination for power systems*. CRC Press, Boca Raton.
- IEEE (1993). *Standard for metal-oxide surge arresters for alternating current power circuits*. Institute of Electrical and Electronics Engineers, Std C62.11-1993, USA.
- Maduro-Abreu, A., Saavedra, A.R., Araújo, J.A., Murça, L.B., Fragelli, R.R., Frontin, S.O., e Rêgo, V.B. (2010). *Prospecção e hierarquização de inovações tecnológicas aplicadas a linhas de transmissão*. Goya Editora, Brasília.
- Mamede, J. (2013). *Manual de equipamentos elétricos*. LTC, Rio de Janeiro, 4ª edição.
- Martinez-Velasco, J. (2015). *Transient Analysis of power systems - solution techniques, tools and applications*. IEEE Press - John Wiley & Sons, West Sussex.
- Mestas, P. e Tavares, M. (2014). Relevant parameters in a statistical analysis - application to transmission-line energization. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 29(6), 2605–2613.
- Moura, A., Moura, A., e Rocha, E. (2019). *Engenharia de Sistemas de Potência - Transmissão de Energia Elétrica em Corrente Alternada*. Ed. UFC, Fortaleza.
- ONS (2011). *Submódulo 2.4 - requisitos mínimos para linhas de transmissão*. Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS), Brasília.
- Prikler, L. e Hoidalén, H.K. (2009). *ATPDraw version 5.6 for Windows 9x/NT/2000/XP/Vista: users' manual*. Norwegian University of Technology Trondheim, Trondheim.
- Rosário, M. (2011). *Coordenação de isolamento em linhas aéreas: metodologias e aplicação à compactação de linhas REN*. Master's thesis, Instituto Superior Técnico - Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa.
- Siemens (2011). *3EL Surge arresters superior protection up to 550 kV*. Siemens AG, Berlim.
- Souza, M. (2020). *Modelo e estudo de sobretensões de energização e descarga atmosférica nos padrões compacto e supercompacto urbanos de linhas de distribuição de alta tensão 138kV*. Master's thesis, Programa de Pós-Graduação em Sistemas de Energia, UFTPR, Curitiba.
- Wei-Gang, H. (2003). Study on conductor configuration of 500-kV Chang-Fang compact line. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 18(3), 1002–1008.
- Zanetta, L. (2003). *Transitórios eletromagnéticos em sistemas de potência*. EdUSP, São Paulo.
- Zanetta, L. (2006). *Fundamentos de sistemas elétricos de potência*. Ed. Livraria da Física, São Paulo.