

ANÁLISE DAS CARACTERÍSTICAS ELÉTRICAS E SOBRETENSÕES EM LINHAS DE TRANSMISSÃO DE MEIO COMPRIMENTO DE ONDA: ABORDAGEM EM REGIME PERMANENTE E TRANSITÓRIO

FELIPE P. ALBUQUERQUE, EDUARDO C. MARQUES COSTA

Depto. Engenharia de Energia e Automação Elétricas, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo
E-mails: felipe.proenca.albuquerque@usp.br, educosta@usp.br

LUISA H. BARTOCCI LIBONI

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de São Paulo
E-mails: luisa.liboni@gmail.br

SÉRGIO KUOKAWA

Depto. Engenharia Elétrica, Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, Universidade Estadual Paulista
E-mails: Kurokawa@dee.feis.unesp.br

Abstract — This paper approaches the principal electric characteristics of half-wavelength transmission lines and possible over-voltage resulted from faults and monopole switching. The main advantages and restrictions in the use of these nonconventional transmission systems are discussed focusing on the current conjecture of the Brazilian interconnected system, emphasizing the principal technical and operational characteristic in steady state with variable load profile. In sequence, possible transient over-voltage cases, resulting from faults and eventual maneuvers, are analyzed and discussed. Finally, possible solutions and alternative techniques for suppression/mitigation of such overvoltages are suggested and properly discussed.

Keywords — Half-wavelength transmissions line, transient overvoltages, insulation coordination, electric power transmission.

Resumo — O artigo aborda as principais características elétricas de linhas de transmissão com meio comprimento, bem como possíveis sobretensões decorrentes de faltas e chaveamento monopolar. As principais vantagens e desvantagens na utilização dessas linhas de transmissão não convencionais são discutidas com enfoque no cenário atual do sistema interligado nacional, ressaltando as principais características técnicas e operacionais em regime permanente com perfil variável de carga. Em sequência, possíveis sobretensões transitórias, resultantes de faltas e eventuais manobras no sistema, são analisadas e discutidas em maiores detalhes. Finalmente, possíveis soluções e técnicas alternativas para supressão/mitigação de tais sobretensões são propostas e discutidas.

Palavras-chave — Linhas de transmissão de meio comprimento de onda, sobretensões transitórias, coordenação de isolamento, transmissão de energia elétrica.

1 Introdução

A transmissão de energia elétrica sempre foi um grande desafio para o setor elétrico brasileiro devido a diversos fatores, tais como: extensão territorial, questões ambientais, relevo diversificado e localização dos grandes centros geradores e de carga.

O Brasil é um país com extensões continentais, dados os mais de 4000 km entre extremos territoriais de norte a sul e de leste a oeste. O potencial hidroelétrico, nos grandes centros industriais e consumidores das regiões sul e sudeste, se encontra quase que totalmente explorado, enquanto que as regiões com grande potencial inexplorado estão localizadas na região norte, aproximadamente 2500 km de distância do estado de São Paulo, que representa um dos maiores centros consumidores do país. Ademais, somam-se grandes desafios para superar questões ambientais relacionadas à grande região amazônica e ao cerrado do planalto central.

Frente às dificuldades apresentadas, sejam de ordem técnica ou ambiental, novas tecnologias para transmissão de energia elétrica por longas distâncias são extensivamente abordadas na literatura técnica (Ku-

rokawa et al., 2012; 2013; Pinto et al., 2011; Fabian e Tavares, 2017; Itiki et al., 2017), relacionando desde linhas de transmissão com potência natural estendida (Sarmiento e Tavares, 2017), variando-se apenas as configurações geométricas das torres e dos condutores múltiplos em sistemas com corrente alternada, até sistemas de transmissão em corrente contínua HVDC (*High Voltage Direct Current*), fazendo uso dos mais sofisticados conversores AC/DC comutados em função da rede em corrente alternada (*Line Commutated Converter* – LCC) ou em função da modulação da largura pulso PWM (*Pulse Width Modulation*) dos transistores retificadores (*Voltage Source Converter* – VSC) (Freitas et al., 2017; Santos et al., 2018; Blond et al., 2016).

Atualmente, com o intuito de mitigar grandes impactos ambientais, torres com mais de 200 metros de altura e vãos que variam entre um a dois quilômetros entre torres são utilizados na interconexão Tucuruí-Macapá-Manaus, através da floresta amazônica e grandes seções sobre rios (Pinto et al. 2011; Kurokawa, 2013). Por outro lado, sistemas LCC-HVDC são amplamente utilizados para transmissão de grandes blocos de energia entre a região Norte e Sudeste, como no caso do *link* em corrente contínua que inter-

liga o complexo hidroelétrico do Rio Madeira à cidade de Araraquara, no interior do estado de São Paulo, com aproximadamente 2400 km de extensão. Durante a construção das unidades hidroelétricas no Rio Madeira, no estado de Rondônia, e projeto do *link* HVDC, houve uma extensiva discussão sobre a viabilidade da construção da primeira linha de transmissão de meio comprimento de onda do mundo, dado o comprimento da linha que representa aproximadamente meio comprimento de onda em 60 Hz.

Embora a linha de meio comprimento de onda apresente evidente vantagem por não necessitar compensação reativa ao longo da transmissão, dada à necessidade da manutenção dos níveis de tensão em regime permanente, sobretensões transitórias em função de eventual desequilíbrio entre as correntes e tensões de fase representam um fator de risco imprevisível na operação desse sistema (Silva et al., 2016; Santos et al., 2014; Santos, 2010; 2012). Com base em tais evidências, optou-se pela construção de um sistema LCC-HVDC entre o complexo hidroelétrico do Rio Madeira e região Sudeste, visto que esse sistema representa uma tecnologia madura e bem estabelecida no Brasil, cujo maior exemplo é o *link* HVDC que liga Itaipu (Foz do Iguaçu, Paraná) à estação conversora na cidade de Ibiúna, no interior do estado de São Paulo.

No entanto, o potencial hidroelétrico da região Norte encontra-se quase que inexplorado, enquanto que a demanda aumenta progressivamente nas grandes regiões densamente povoadas e industrializadas, tanto nas regiões Sul e Sudeste quanto na região Centro-Oeste e extremo Nordeste do Brasil. Dessa forma, a proposta de um sistema de transmissão de meio comprimento de onda ainda encontra-se em pauta como uma técnica alternativa de transmissão de energia elétrica a partir da bacia amazônica na região Norte, dadas as vantagens técnicas e econômicas amplamente discutidas na literatura técnica (Santos, 2010; 2012).

Com base na breve revisão bibliográfica, apresentada de forma sucinta e introdutória, e nas premissas no parágrafo anterior, propõe-se uma análise técnica e teórica sobre linhas de transmissão de meio comprimento de onda, abordando suas principais características elétricas em regime permanente e transitório. O *Alternative Transient Program* – ATPDraw é utilizado para simulações de falta fase-terra, abertura monopolar, energização e resultantes sobretensões transitórias ao longo da linha, possibilitando assim a discussão sobre técnicas alternativas de proteção e contenção de sobretensões, pouco discutidas nas referências técnicas listadas nesta pesquisa.

2 Análise do sistema em regime permanente

Primeiramente, aspectos importantes sobre a operação de linhas de transmissão de meio comprimento de onda são discutidos. Para tanto, será utilizada a representação de linhas de transmissão por meio de parâmetros distribuídos para análise em regime,

relembrando alguns aspectos importantes como: impedância característica, constante de propagação e representação por quadripolo (Zanetta, 2003).

As características de propagação de uma linha de transmissão são dadas em função dos parâmetros elétricos, ou seja, a impedância série e admitância transversal. Logo, a constante de propagação γ é expressa (Zanetta, 2003):

$$\gamma = \sqrt{(R + j\omega L)(G + j\omega C)} \quad (1)$$

$$\text{Re}\{\gamma\} = \alpha$$

$$\text{Im}\{\gamma\} = \beta$$

Sendo R , L , C e G são a resistência, indutância, capacitância e condutância, respectivamente. A velocidade angular, em função da frequência f do sinal em regime, é $\omega = 2\pi f$. A parcela real da constante de propagação α representa a atenuação ao longo do meio de propagação, enquanto que a parcela imaginária β é definida como desvio de fase. Convencionalmente, na representação de linhas aéreas de transmissão, a condutância transversal G pode ser desprezada (Martí, 1982).

A partir da constante de propagação γ pode-se determinar o comprimento de onda eletromagnética do sistema:

$$\lambda = 2\pi/\beta \quad (2)$$

Supondo que as perdas e atenuação da linha sejam muito pequenas ($\alpha = 0$), o comprimento de onda para $f = 60$ Hz pode ser expresso por:

$$\lambda = \frac{2\pi}{\omega \sqrt{LC}} = \frac{1}{f \sqrt{LC}} \approx \frac{c}{f} \quad (3)$$

Sendo c a velocidade de propagação da luz no vácuo, o comprimento de onda será de aproximadamente 5000 km em 60 Hz, logo a linha de meio comprimento de onda terá aproximadamente 2500 km de comprimento.

Embora uma linha de meio comprimento de onda exato apresente pontos operacionais instáveis, as análises são realizadas considerando-se uma linha de 2500 km, visto que as características de tensão e corrente das linhas de meia onda exata se aproximam muito das características de uma linha de um pouco mais de meio comprimento de onda para as situações analisadas (Vidigal, 2010).

2.1 Perfil de tensão e corrente em regime

Considera-se para a análise em regime permanente que a linha de meio comprimento de onda seja idealmente transposta e modelada por meio da representação por parâmetros distribuídos no domínio da frequência. Ademais, sendo o sistema simétrico e equilibrado, os valores tensão em qualquer ponto da linha de transmissão podem ser obtidos em função da tensão no terminal emissor, como expresso em (4).

$$\begin{bmatrix} \hat{V}(x) \\ \hat{I}(x) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cosh(\gamma x) & -Z_c \sinh(\gamma x) \\ -\frac{1}{Z_c} \sinh(\gamma x) & \cosh(\gamma x) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{V}_e \\ \hat{I}_e \end{bmatrix} \quad (4)$$

O termo Z_c é a impedância característica da linha. Os termos $\hat{V}(x)$ e $\hat{I}(x)$ são fasores de tensão e corrente de sequência positiva em um ponto distante x km do terminal emissor, enquanto que \hat{V}_e e \hat{I}_e são os fasores de tensão e corrente de sequência positiva no terminal emissor.

A equação (4) pode ser descrita em função da tensão e corrente no terminal receptor, ou seja, em função do terminal de carga. Dessa forma, a carga é representada em função da tensão no terminal receptor, com descrito em (5). No caso de uma linha de meio comprimento de onda, basta determinar a condição em que $x = \lambda/2$.

$$\begin{bmatrix} \hat{V}_e \\ \hat{I}_e \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cosh(\gamma l) & Z_c \sinh(\gamma l) \\ \frac{1}{Z_c} \sinh(\gamma l) & \cosh(\gamma l) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{V}_r \\ \hat{I}_r \end{bmatrix} \quad (5)$$

Como discutido anteriormente, linhas com potência natural elevada são caracterizadas por poucas perdas e conseqüentemente pequena atenuação. Dessa forma, considera-se que a resistência série da linha seja menor possível, configurando uma linha ideal sem perdas. Portanto, a constante de propagação é dada por $\gamma = j\beta$ e a relação da tensão nos terminais emissor e receptor é definida como:

$$\begin{aligned} \hat{V}_e &= \cosh(j\beta l) \hat{V}_r + Z_c \sinh(j\beta l) \hat{I}_r \\ \hat{V}_e &= \cos\left(\frac{2\pi}{\lambda} l\right) \hat{V}_r = \cos\left(\frac{2\pi \lambda}{\lambda} \frac{l}{2}\right) \hat{V}_r \\ \hat{V}_e &= -\hat{V}_r \end{aligned} \quad (6)$$

Observa-se em (6) que o módulo da tensão nos terminais receptor e emissor são iguais, independente da carga. Portanto, observa-se que a linha de meio comprimento de onda não necessita de compensação reativa para controle das tensões nas barras junto aos terminais. Dessa mesma forma, a relação das correntes nos terminais é análoga à das tensões:

$$\hat{I}_e = -\hat{I}_r \quad (7)$$

O módulo das correntes nos terminais emissor e receptor é igual.

2.2 Tensões e correntes para linha em carga

Os valores tensão e corrente em qualquer ponto da linha com carga podem ser calculados considerando-se a impedância complexa da carga Z_T , tal como descrito nas equações (8) e (9). Ressaltando que o terminal receptor, conectado a carga, é localizado em $x_r = 0$.

$$\hat{V}(x) = \cosh(j\beta x) \hat{V}_r - Z_c \sinh(j\beta x) \left(\frac{\hat{V}_r}{Z_T}\right) \quad (8)$$

$$\hat{I}(x) = -\frac{1}{Z_c} \sinh(j\beta x) \hat{V}_r + \cosh(j\beta x) \left(\frac{\hat{V}_r}{Z_T}\right) \quad (9)$$

A partir de (8) e (9), as tensões e correntes ao longo da linha podem ser definidas. Ressaltando que o máximo do efeito Ferranti é obtido com um quarto de comprimento de onda, ou seja, para $x = \lambda/4$. Logo, com base na expressão (8), tem-se a tensão máxima ao longo da linha de forma analítica:

$$\begin{aligned} \hat{V}\left(\frac{\lambda}{4}\right) &= \cosh\left(\frac{\pi}{2}\right) \hat{V}_r - \frac{Z_c}{Z_T} \sinh\left(\frac{j\pi}{2}\right) \hat{V}_r \\ \hat{V}\left(\frac{\lambda}{4}\right) &= -j \frac{Z_c}{Z_T} \hat{V}_r \end{aligned} \quad (10)$$

Se Z_c e Z_T são números reais, pode-se escrever:

$$\left|\hat{V}\left(\frac{\lambda}{4}\right)\right| = \frac{Z_c}{Z_T} |\hat{V}_r| \quad (11)$$

A expressão (11) permite concluir que magnitude da tensão no meio da linha é proporcional à relação Z_c/Z_T , visto que o módulo da tensão no terminal receptor é aproximadamente constante e igual ao valor no terminal emissor. Nesse caso, a relação Z_c/Z_T também representa o carregamento da linha em potência ativa e em função da potência característica, tal como descrito na definição de potência característica ou também conhecida como potência natural da linha (Kundur, 1994):

$$P_c = Re \left\{ \frac{|V_L|^2}{Z_c} \right\} \quad (12)$$

O termo V_L representa a tensão de linha do sistema. Considerando uma linha sem perdas, Z_c é real, logo:

$$P_c = \frac{|V_L|^2}{Z_c} \quad (13)$$

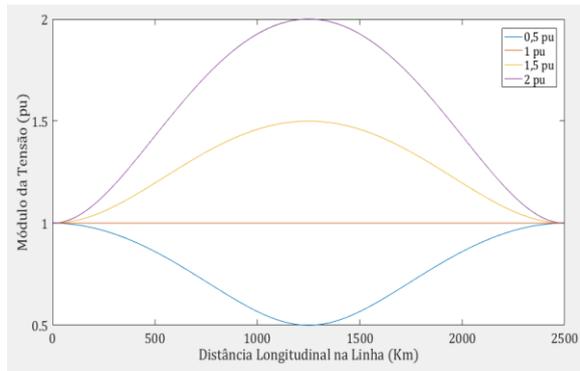
Supondo que a carga de impedância por fase Z_T seja conectada ao terminal receptor da linha, a potência ativa é dada por:

$$P_r = Re \left\{ \frac{|V_r|^2}{Z_T} \right\} \quad (14)$$

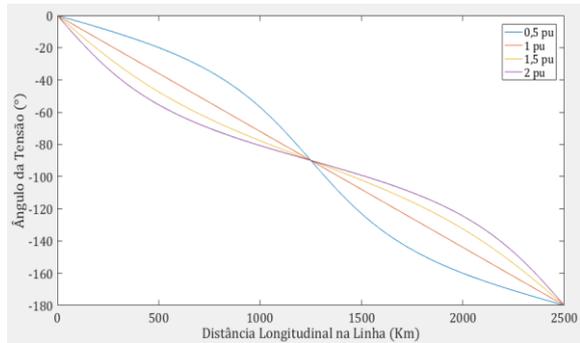
Como a tensão no terminal receptor da linha é similar à do terminal emissor, no caso de fator unitário, ou seja, Z_T é real:

$$\frac{P_r}{P_c} = \frac{|V_r|^2}{Z_T} \frac{Z_c}{|V_L|^2} \approx \frac{Z_c}{Z_T} \quad (15)$$

Com base nas equações (8), (9) e da relação descrita em (15) é possível determinar o perfil de tensão e de corrente ao longo da linha de transmissão tomando como referência o terminal receptor. Sendo a tensão e corrente fasoriais, são analisados módulo e fase, tal como mostra nas figuras 1 e 2.

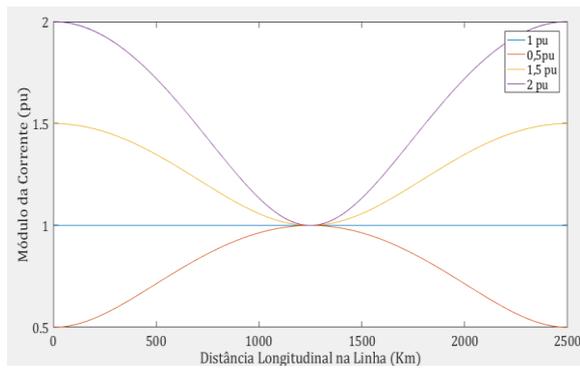


(a)

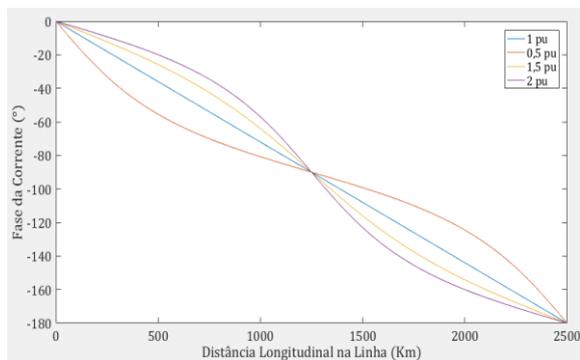


(b)

Figura 1. Módulo (a) e ângulo (b) da tensão em função do comprimento da linha.



(a)



(b)

Figura 2. Módulo (a) e ângulo (b) da corrente em função do comprimento da linha

Observa-se que a carga conectada ao terminal receptor influencia diretamente o perfil de tensão e de corrente da linha de meio comprimento de onda. Como descrito previamente de forma analítica, a

maior sobretensão ao longo da linha encontra-se no ponto correspondente a um quarto do comprimento de onda $x = \lambda/4$. A figura 1a mostra que quando a carga demanda potência ativa de 2 pu, a tensão equivalente próxima ao ponto mediano ao longo da linha também é próxima a 2 pu. Dessa forma, o sistema de transmissão de meio comprimento de onda deve operar com controle permanente de potência ativa em seus terminais para manutenção dos níveis de tensão próximos à seção mediana ao longo da linha.

A figura 2 descreve comportamento análogo para as correntes próximas aos terminais da linha. Observa-se que os níveis de corrente nos terminais estão também em função da demanda por potência ativa.

2.3 Análise no domínio do tempo

A análise fasorial, por meio da formulação analítica apresentada previamente, mostra precisamente o comportamento das tensões e correntes ao longo da linha no domínio da frequência. No entanto, para análise adequada das possíveis sobretensões sobre esse mesmo sistema, e até mesmo validação das informações apresentadas no domínio da frequência, faz-se necessária a análise por meio de simulações no domínio do tempo. Logo, propõe-se um estudo em regime permanente no domínio do tempo, fazendo uso do *Alternative Transient Program* – ATP, utilizado convencionalmente na simulação de transitórios eletromagnéticos impulsivos, na ordem de microssegundos (e.g. descargas atmosféricas), como também na simulação das correntes e tensões durante transitórios oscilatórios em sistemas de potência, na ordem de alguns segundos.

O sistema composto por linha de meio comprimento de onda é descrito no diagrama unifilar da figura 3. O equivalente Thevenin junto aos terminais emissor e receptor da linha foi baseado nos dados descritos previamente na literatura técnica de referência (Küsel et al., 2012). A única variação está na modelagem das fontes equivalentes, sendo a resistência de sequência positiva igual à de sequência zero para o equivalente do terminal receptor.

A modelagem da linha de meio comprimento de onda é baseada nas dimensões físicas dos condutores e das torres com tensão nominal 1000 kV, descritas em detalhes na literatura técnica (Santos, 2010).

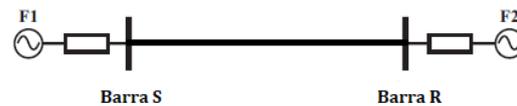


Figura 3. Diagrama unifilar do circuito utilizado para simulação.

Os parâmetros elétricos do sistema modelado no ATP são apresentados na tabela 1.

Tabela 1. Parâmetros do sistema

Linha de Transmissão					
Sequência Zero			Sequência Positiva		
R_0 (Ω/km)	X_0 (Ω/km)	B_0 ($\mu S/km$)	R_1 (Ω/km)	X_1 (Ω/km)	B_1 ($\mu S/km$)
0,34869	1,2591	3,3351	0,01276	0,2121	7,7642
Constantes eletromagnéticas					
α	$3,3515 \cdot 10^{-4}$ (dB/Km) $3,8585 \cdot 10^{-5}$ (Np/Km)				
β	0,001284 (Km ⁻¹)				
Z_c	165,44 $e^{-j1,7214^\circ}$ (Ω)				
P_c	6042 (MW)				
v	293623 (Km/s)				
λ	4894 (Km)				
$\lambda/2$	2447 (Km)				
Equivalentes de Thevenin					
Fontes	Seq. Zero	Seq. Positiva			
Emissor (S)	0,2062 + j14,434	0,2062 + j14,434			
Receptor (R)	1,4443 + j28,868	1,4443 + j28,868			

Inicialmente, são apresentadas simulações com a linha de meio comprimento de onda operando com 1 e 2 pu de carga. Os valores de tensão são analisados no terminal emissor (curva azul), terminal receptor (curva vermelha) e no meio da linha (curva verde), como descrito nas figuras 4 e 5.

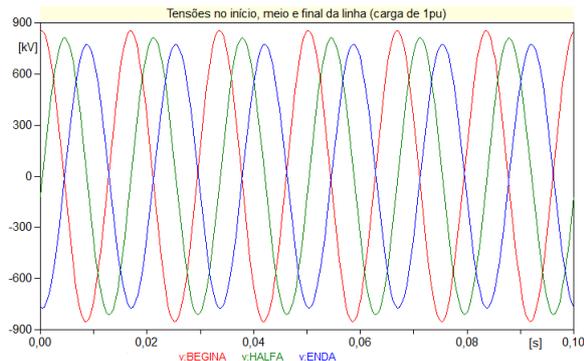


Figura 4. Simulação da linha com carregamento de 1 pu.

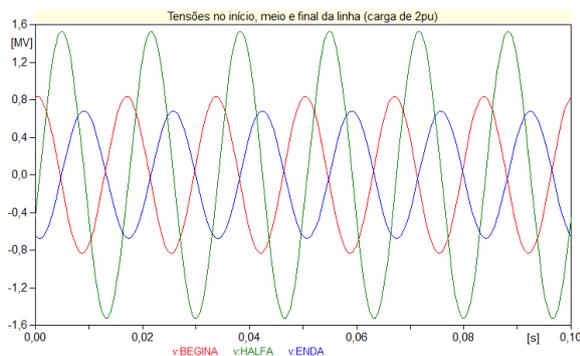


Figura 5. Simulação da linha com carregamento de 2 pu.

Os níveis de tensão observados nas figuras 4 e 5 estão de acordo com os valores previamente calcula-

dos de forma analítica. O valor de tensão no terminal receptor da linha é aproximadamente 8,7% abaixo do valor nominal de 1000 kV (1 pu) devido à inclusão da resistência série de sequência positiva na modelagem da linha, como descrito na tabela 1.

3 Análise do sistema em regime transitório

As linhas de transmissão de meio comprimento de onda apresentam características peculiares durante alguns fenômenos transitórios. Tais características as diferenciam se comparadas às linhas de transmissão convencionais, requerendo maiores cuidados quanto à análise da coordenação de isolamento do sistema como um todo.

Três situações são simuladas no domínio do tempo para análise de possíveis sobretensões ao longo da linha de transmissão de meio comprimento de onda: curto-circuito monofásico, energização e abertura monopolar.

3.1 Curto-circuito monofásico

Durante um curto-circuito monofásico, ou desequilíbrio nas tensões e correntes de fase, a linha de transmissão de meio comprimento de onda pode apresentar ressonâncias na frequência de 60 Hz, resultando em sobretensões ao longo da linha (Vidigal, 2010).

A linha foi modelada por 48 segmentos de linha em série, sendo cada trecho representado por parâmetros distribuídos com aproximadamente 52 km cada, tal como previamente proposto na literatura técnica sobre o tema de pesquisa (Santos, 2010). A modelagem utilizando circuitos equivalentes em série se faz necessária para determinar o perfil de tensão e corrente no domínio do tempo ao longo da linha.

O curto-circuito é modelado por meio de uma resistência constante de 20 Ω e simulado em diversos pontos da linha. A maior sobretensão é observada na ocorrência da falta a 1781 km do terminal emissor da linha, a 677 km desse mesmo terminal.

As figuras 6 e 7 mostram os níveis de tensão em $x = 677$ km, considerando carga conectada ao terminal receptor de 1 e 2 pu, respectivamente.

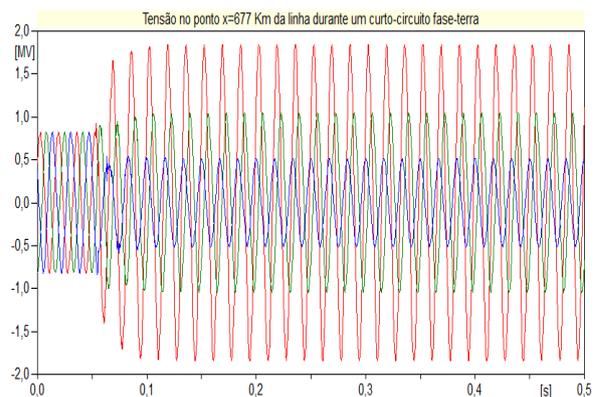


Figura 6. Tensões durante o curto-circuito monofásico com carregamento de 1 pu.

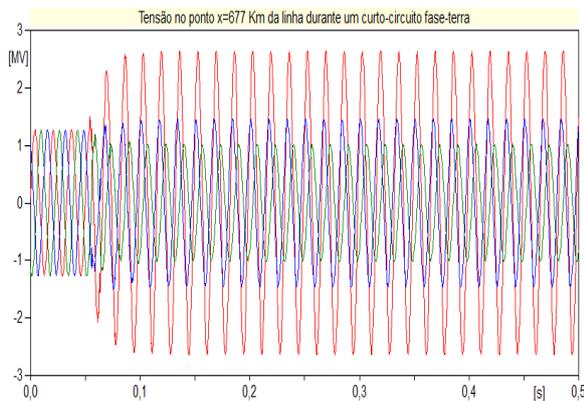


Figura 7. Tensões durante o curto-circuito monofásico com carregamento de 2 pu.

A curva vermelha mostra a tensão na fase sob falta no ponto $x = 677$ km. Observa-se que a sobretensão resultante do curto-circuito fase-terra é de aproximadamente 1,8 pu para a linha com carregamento de 1 pu e aproximadamente 2,3 pu considerando carga de 2 pu conectada ao terminal receptor da linha. Dessa forma, pode-se constatar que a linha de meio comprimento de onda é submetida a sobretensões altíssimas frente eventual desequilíbrio na magnitude das tensões e correntes nas fases.

3.2 Manobra de energização da linha

A partir de simulações utilizando o ATP, foram investigadas as máximas sobretensões resultantes do chaveamento da linha de meio comprimento de onda. Nesse caso, as variáveis consideradas foram o tempo de fechamento da chave e o ponto de monitoramento da tensão. A chave foi fechada no instante 0,05 segundos de simulação, tal como descrito na figura 8.

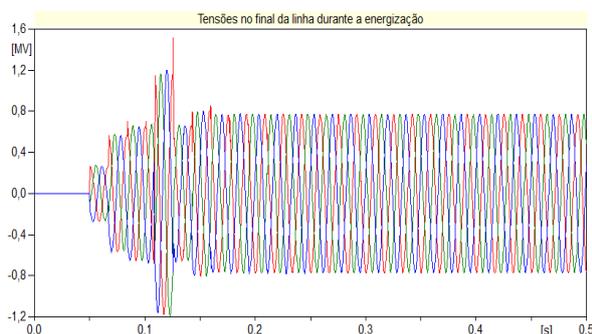


Figura 8. Tensões no terminal receptor da linha durante a energização mediante chaveamento no terminal emissor.

A maior sobretensão observada foi de 2,05 pu no terminal receptor da linha. Nesse contexto e com base na literatura técnica sobre linhas de transmissão, as sobretensões observadas na linha com meio comprimento de onda não diferem significativamente das linhas convencionais. Sendo assim, técnicas convencionais de contenção de sobretensão devido a manobras podem ser utilizadas em linhas de meio comprimento de onda, tais como: inserção de resistores de pré-inserção ou para-raios de óxido metálico junto

aos transformadores GSU (*generator step-up*) na entrada das subestações.

3.3 Abertura monopolar da fase em curto-circuito

As faltas assimétricas e condições de operação em desequilíbrio, tal como curto-circuito fase-terra simulado no item 3.1, representam um fator crítico a ser avaliado de forma criteriosa no projeto de linhas de transmissão de meio comprimento de onda. Nesse contexto, o efeito da abertura monopolar da fase faltosa sobre as fases sãs deve ser analisado. As tensões nas fases sãs, após a abertura monopolar da fase em falta, foram simuladas fazendo uso do ATP e descritas na figura 9.

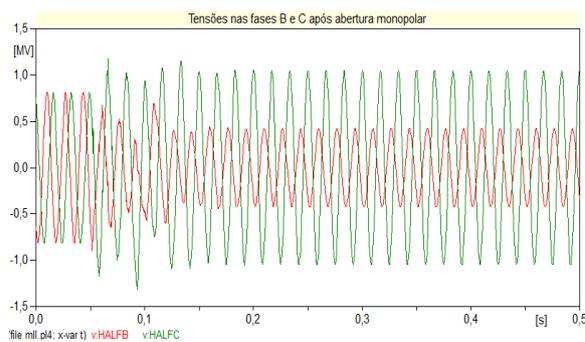


Figura 9. Tensões nas fases sãs após abertura monopolar

Logo após a abertura monopolar da fase em falta, observam-se alguns picos de tensão de até 1,4 pu. No entanto, verifica-se que a fase B segue operando com tensão abaixo de 0,5 pu enquanto que a fase C se mantém em 1 pu. Dessa forma, a abertura monopolar não resulta em sobretensões significativas sobre as fases sãs da linha.

3.4 Transitórios resultantes de impulso atmosférico

Para análise da linha de meio comprimento de onda frente impulso atmosférico, foi injetado um sinal de corrente do tipo rampa, com 8 μ s de frente, 20 μ s de calda e 10 kA de pico. Trata-se de uma forma de onda normalizada para análise da coordenação de isolamento de componentes de sistemas de potência frente descargas atmosféricas (Zanetta, 2003).

Após analisar a incidência do impulso atmosférico diretamente na fase A em diversos pontos ao longo da linha, verifica-se que a sobretensão produzida trata-se de um efeito local e rapidamente atenuado durante a propagação devido à ação de para-raios instalados ao longo da linha, efeito corona ou mesmo provável *flashover* através das cadeias de isoladores nas torres. Vale observar também que a incidência de descarga atmosférica direto nas fases representa um caso crítico, ou seja, falha da blindagem oferecida pelos cabos para-raios da linha.

A figura 10 mostra a sobretensão transitória gerada no terminal emissor da linha.



Figura 10. Tensão resultante de impulso atmosférico.

O pico de tensão chega a 4,5 pu, valor similar a uma linha de transmissão com comprimento convencional (Zanetta, 2003). Dessa forma, métodos convencionais, utilizando para-raios de ZnO nas subestações e em ao longo da linha (pendurados em paralelo com as cadeias de isoladores nas torres) são adequados para contenções dessas sobretensões.

4 Conclusão

As linhas de transmissão de meio comprimento de onda são uma das alternativas para transmissão de grandes blocos de energia por longas distâncias. No entanto, se faz necessário uma análise criteriosa sobre possíveis faltas assimétricas e condições de operação em desequilíbrio, que podem resultar em ressonância e sobretensões sustentadas em diversos pontos da linha. Ademais, para manutenção da tensão nas seções intermediárias da linha, se faz necessário controle rigoroso da demanda por potência ativa nos terminais da linha, não devendo exceder as características nominais do sistema. Esses dois pontos representam situações críticas de operação e necessitam métodos alternativos de proteção e controle.

A operação do sistema em um ponto ótimo de transmissão de potência ativa representa um fator crucial para eficiência da transmissão em meio comprimento de onda, visto que a operação em sobrecarga resulta em níveis de tensão altíssimos nas seções intermediárias da linha.

Como técnica alternativa para contenção de possíveis sobretensões ao longo da linha, principalmente decorrentes de eventual desequilíbrio nas condições de operação, propõe-se a utilização de para-raios de linha conectados em paralelo com as cadeias de isoladores nas torres. Vale ressaltar que é importante uma análise criteriosa sobre as características técnicas dos para-raios a serem utilizados em cada trecho da linha de acordo com o nível de tensão demonstrado nas simulações, tais como a máxima tensão de operação contínua (MCOV) e capacidade de absorção de energia.

Agradecimentos

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo – FAPESP (Proc. 2016/16078-7)

Referências Bibliográficas

- Blond, S.; Bertho, R. e Coury, D. V. (2016). Design of protection schemes for multi-terminal HVDC systems. *Renewable & Sustainable Energy Review*, Vol. 56; pp. 965-974.
- Fabian, R. G. e Tavares, M. C. (2017). Faulted phase selection for half-wavelength power transmission lines. *IEEE Trans. Power Delivery*, Vol. 33; pp. 992-1001.
- Freitas, V. A. L.; Coury, D. V. e Monaro, R. M. (2017). LCL filter design for VSC-HVDC systems supplying passive grids. *Electric Power Systems Research*, Vol. 152; pp.160-167.
- Itiki, R.; Di Santo, S. G.; Costa, E. C. M e Monaro, R. M. (2017). Methodology for mapping operational zones of VSC-HVDC transmission system on offshore ports. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, Vol. 93, pp. 266-275.
- Lacerda, V. A.; Coury, D. V. e Monaro, R. (2017). LCL filter design for VSC-HVDC systems supplying passive grids. *Electric Power Systems Research*, Vol. 152; pp. 160-167.
- Marti, J. R. (1982). Accurate modeling of frequency-dependent transmission lines in electromagnetic transient simulations, Vol. PAS-101, No. 1; pp.147-155.
- Pinto, A. J. G.; Costa, E. C. M.; Kurokawa, S. e Pissolato J. (2011). Analysis of the electrical characteristics of an alternative solution for the Brazilian-Amazon transmission system. *Electric Power Components and Systems*, Vol. 39; pp. 1424-1436.
- Kundur, P. *Power system stability and control*. McGraw-Hill, 1994.
- Kurokawa, S.; Costa, E. C. M.; Brandt, I. S. e Pissolato, J. (2012). New approach to four-phase transmission systems: analysis of the transient response and the possible voltage surges. *IET Generation, Transmission & Distribution*, Vol. 6; pp.387-394.
- Kurokawa S.; Costa, E. C. M.; Pinto, A. J. G. e Pissolato J. (2013). Analysis of electric characteristics of high-elevation stretches of the Tucuruí-Macapá-Manaus connection. *Journal of Control, Automation and Electrical Systems*, Vol. 24; pp.714-724.
- Küsel, B. F.; Mateus, A. S. e Silva, K. M. (2012). Avaliação do desempenho da proteção de distância aplicada às linhas de transmissão com pouco mais de meio comprimento de onda. *IV Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétrico*, Goiânia, GO.
- Santos, M. L. (2010). Avaliação do desempenho de linhas de transmissão de energia elétrica em

- meia onda. Dissertação de Mestrado, Universidade de São Paulo.
- Santos, M. L. (2012). Transmissão de energia elétrica em meia-onda e em corrente contínua – análise técnico-econômica. Tese de Doutorado, Universidade de São Paulo.
- Santos, M. L.; Jardini, J. A.; Casolari, R. P.; Arnez, R. L. V.; Saiki, G. Y.; Sousa, T. e Nicola, G. L. C. (2014). Power transmission over long distances: economic comparison between HVDC and half-wavelength line. *IEEE Trans. Power Delivery*, Vol. 29; pp. 502-509.
- Santos, R. C.; Blond, S.; Coury, D. V. e Aggarwal, R. K. (2018). An intelligent backup scheme for current source converter – High voltage direct current systems based on artificial neural network. *Electric Power Components and Systems*, Vol. 45; pp. 1-13.
- Sarmiento, J. S. A. e Tavares, M. C. (2017). Methodology for optimizing the capacity and costs of overhead transmission lines by modifying their bundle geometry. *Electric Power Systems Research*, Vol. 1; pp. 1-10 [online].
- Silva, E. A.; Moreira, F. A. e Tavares, M. C. (2016). Energization simulations of a half-wavelength transmission line when subject to three-phase faults – application to a field test situation. *Electric Power System Research*, Vol. 138; pp. 58-65.
- Vidigal, R. F. (2010). Análise do comportamento de uma linha de um pouco mais de meio comprimento de onda sob diferentes condições de operação em regime permanente e durante manobra de energização. Dissertação de Mestrado, Universidade Estadual de Campinas.
- Zanetta, L. C. *Transitórios Eletromagnéticos em Sistemas de Potência*. Edusp, 2003.