

RESSALVA

Atendendo solicitação do autor, o texto completo desta dissertação será disponibilizado somente a partir de 06/03/2020.

**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE MESQUITA FILHO”
FACULDADE DE ENGENHARIA
CAMPUS DE ILHA SOLTEIRA**

JÚLIO CESAR SANTOS FERRARI

**CONSEQUÊNCIA DA RECAPACITAÇÃO DE LINHAS DE TRANSMISSÃO POR
INJEÇÃO DE COMPONENTE DE TERCEIRA HARMÔNICA**

Ilha Solteira
2019

JÚLIO CESAR SANTOS FERRARI

**CONSEQUÊNCIA DA RECAPACITAÇÃO DE LINHAS DE TRANSMISSÃO POR
INJEÇÃO DE COMPONENTE DE TERCEIRA HARMÔNICA**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira – UNESP como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica. Área do conhecimento: Automação.

Sérgio Kurokawa
Orientador

Ilha Solteira
2019

FICHA CATALOGRÁFICA

Desenvolvido pelo Serviço Técnico de Biblioteca e Documentação

F375c Ferrari, Júlio Cesar Santos.
Consequência da recapacitação de linhas de transmissão por injeção de componente de terceira harmônica / Júlio Cesar Santos Ferrari. -- Ilha Solteira: [s.n.], 2019
92 f. : il.

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia. Área de conhecimento: Automação, 2019

Orientador: Sérgio Kurokawa
Inclui bibliografia

1. Recapacitação. 2. Transitórios eletromagnéticos. 3. Sistemas de potência.
4. Tensão de terceira harmônica.

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO DA DISSERTAÇÃO: Consequência da Recapitação de Linhas de Transmissão por Injeção de Componente de Terceira Harmônica


AUTOR: JÚLIO CESAR SANTOS FERRARI

ORIENTADOR: SERGIO KUROKAWA


Aprovado como parte das exigências para obtenção do Título de Mestre em ENGENHARIA ELÉTRICA, área: Automação pela Comissão Examinadora:


Prof. Dr. SERGIO KUROKAWA

Departamento de Engenharia Elétrica / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira


Prof. Dr. FALCONDES JOSE MENDES DE SEIXAS

Departamento de Engenharia Elétrica / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira


Prof. Dr. RODRIGO CLEBER DA SILVA

Instituto Federal de Ensino, Ciência e Tecnologia de São Paulo - IFSP

Ilha Solteira, 06 de setembro de 2019

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, pelo dom da vida e por todas as oportunidades colocadas em meu caminho.

Dedico este trabalho aos meus pais, Odair e Marly, pelo amor incondicional e por nunca medirem esforços para garantir que eu tivesse tudo que necessitava.

Agradeço imensamente ao professor Dr. Sérgio Kurokawa, por toda orientação, conselhos e ao apoio a mim concedidos desde a época em que fiz iniciação científica, em 2014.

Meu muito obrigado aos colegas de laboratório: Anderson Ricardo Justo de Araújo, Jaimis Sajid Leon Colqui e Tainá Fernanda Garbelim Pascoalato. Pela amizade, trocas de conhecimento e por todo suporte dado a mim durante a realização deste trabalho.

A todos os funcionários da UNESP – Ilha Solteira, por todo apoio e prontidão em solucionar problemas técnicos e burocráticos.

Aos amigos que conquistei nesse período em Ilha Solteira, com quem compartilhei muitos bons momentos.

Agradeço à Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira – UNESP.

Finalmente, minha gratidão ao CNPq, pelo apoio financeiro dado durante o período de mestrado.

RESUMO

Esta dissertação apresenta um estudo realizado sobre o método de recapacitação de linhas de transmissão por injeção de tensão de terceira harmônica (TTH). O método foi publicado em 2017 por Alaei e Khajehoddin como uma proposta mais economicamente viável de elevar a tensão de transmissão sem a necessidade de alterações nas estruturas das linhas de transmissão. A injeção de TTH em linhas convencionais tem como objetivo provocar um achatamento na forma de onda das tensões de fase, causando uma redução em seu valor de pico. O método se mostra vantajoso pelo fato de que a largura das faixas de servidão e as distâncias entre cabos condutores e solo são especificadas com base no valor de pico das tensões de fase. Logo, a redução da tensão de pico não somente permitiria às estruturas existentes transmitirem maior potência como também possibilitaria a construção de novas torres de transmissão com tamanho reduzido e faixas de servidão mais estreitas, tornando uma proposta economicamente atrativa para as companhias de transmissão de energia elétrica. No artigo em que o método de recapacitação em questão foi proposto, os autores realizam análises de tensões e correntes apenas nos terminais das LTs. A contribuição deste trabalho para os estudos do método de recapacitação por injeção de TTH, consiste nas análises feitas através de um modelo de linha de transmissão a parâmetros distribuídos, que permitiu o monitoramento das tensões de fase ao longo da extensão de linhas com diferentes comprimentos, tanto em regime permanente como durante a energização do sistema. Os resultados mostraram que a injeção de TTH causa sobretensões ao longo da extensão de linhas mais longas que 200 km, nos pontos fora dos terminais. Dependendo do comprimento da LT, os valores de amplitude das tensões de fase podem até mesmo excederem o valor da tensão nominal das estruturas, impondo assim uma limitação à essa nova técnica de recapacitação.

Palavras-chave: Recapacitação. Transitórios eletromagnéticos. Sistemas de potência. Tensão de terceira harmônica.

ABSTRACT

This work presents a study concerning the transmission line uprating method by injection of third harmonic voltage (THV). The method was published in 2017 by Alaei and Khajehoddin as a more economically feasible proposal to raise the transmission voltage level without the requirement for changes in the structural elements of overhead lines. The THV injection in conventional overhead lines aims to flatten the waveform of the phase voltages, resulting in a reduction in its peak values. This represents a significant advantage, since the specification of right-of-way (ROW) width and ground clearance bases on the peak value of the phase voltages. Therefore, a reduction in the peak voltage would not only allow the existing structures to transmit electricity at higher voltages but also the construction of new transmission towers with reduced size and narrower ROW, making it an economically attractive proposal for electric power transmission companies. In the article in which the referred uprating method was proposed, the authors perform voltage and current analyzes only at the TL ends. The contribution of this work to the studies of the uprating method by THV injection consists in the analyzes made through a distributed parameter transmission line model, which allowed the monitoring of the phase voltages along the extension of lines with different lengths, both at steady-state and during the system switching. The results showed that THV injection causes overvoltage along the extent of lines that are longer than 200 km, at the points outside the terminals. Depending on the length of the TL, the phase voltage amplitude values may even exceed the nominal voltage of the structures, thus imposing a limitation on this new uprating technique.

Keywords: Uprating. Electromagnetic transients. Power systems. Third harmonic voltage.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Representação esquemática da técnica <i>Nip</i>	16
Figura 2 – Representação esquemática da técnica <i>Tuck</i>	16
Figura 3 – Substituição de elementos estruturais em uma torre de transmissão.	17
Figura 4 – Adição de Extensão ao Topo da Torre de Transmissão.....	18
Figura 5 – Elevação de uma torre de transmissão.	19
Figura 6 – Isolador do tipo <i>floating dead-end</i>	21
Figura 7 – Imagem 3D captada por um dispositivo LiDAR.....	23
Figura 8 – Injeção de componente de terceira harmônica no centro-estrela do transformador no terminal emissor.	25
Figura 9 – Gerador trifásico simétrico de sequência positiva com fonte de TTH aplicada no centro-estrela.	26
Figura 10 – Componentes fundamentais e TTH.....	28
Figura 11 – Tensão de fase v_{AN} de 1 p.u. somada com TTH v_{TH} de amplitude 1/6 p.u.	29
Figura 12 – Tensões de fase resultantes da injeção de TTH.	29
Figura 13 – Tensão de fase com TTH de diferentes amplitudes.	30
Figura 14 – Tensão de fase resultante limite com TTH de amplitude 1/6 p.u.	34
Figura 15 – Efeito do defasamento angular entre as componentes v_{AN} e v_{TH} . (a) Sem defasamento, (b) defasamento de 10°, (c) defasamento de 60°.	35
Figura 16 – Injeção de componente de terceira harmônica no centro estrela de ambos os transformadores da linha de transmissão.....	36
Figura 17 – Silhueta e parâmetros da linha de transmissão estudada.....	39
Figura 18 – Diagrama esquemático de uma linha trifásica com dupla injeção de TTH.....	40
Figura 19 – Linha de transmissão trifásica convencional.....	41
Figura 20 – Tensões de fase no terminal emissor de uma linha de 300 km operando a plena carga durante energização e regime permanente: (a) sem injeção de TTH, (b) com dupla injeção de TTH.....	42
Figura 21 – Tensão de fase v_{FC} de uma LT de comprimento 300 km com e sem injeção de TTH.....	43
Figura 22 – Esquema para simulação da TTH isolada.	44
Figura 23 – Formas de onda das tensões de fase nos terminais e no ponto médio da linha de 100 km com injeção de TTH.	44
Figura 24 – Perfis de tensão da linha de 100 km.....	45
Figura 25 – Formas de onda das tensões de fase nos terminais e no meio da linha de 200 km com injeção dupla de TTH.	46
Figura 26 – Perfis de tensão da linha de 200 km.....	46
Figura 27 – Formas de onda das tensões de fase nos terminais e no meio da linha de 300 km com injeção dupla de TTH.	47
Figura 28 – Perfis de tensão da linha de 300 km.....	47

Figura 29 – Tensões de fase nos terminais e no meio da linha de 400 km com injeção dupla de TTH.....	48
Figura 30 – Perfis de tensão da linha de 400 km.....	49
Figura 31 – Tensões de fase nos terminais e no meio da linha de 500 km com injeção dupla de TTH.....	49
Figura 32 – Perfis de tensão da linha de 500 km.....	50
Figura 33 – Tensões de fase nos terminais e no meio da linha de 600 km com injeção dupla de TTH.....	51
Figura 34 – Perfis de tensão da linha de 600 km.....	52
Figura 35 – Tensões de fase nos terminais e no meio da linha de 700 km com injeção dupla de TTH.....	52
Figura 36 – Perfis de tensão da linha de 700 km.....	53
Figura 37 – Tensões de fase nos terminais e no meio da linha de 1000 km com injeção dupla de TTH.....	54
Figura 38 – Perfis de tensão da linha de 1000 km.....	54
Figura 39 – Amplitude da componente de terceira harmônica no ponto médio de linhas com diferentes comprimentos.	56
Figura 40 – Diagrama unifilar de uma linha de comprimento d com injeção de TTH sem o gerador trifásico e a carga.....	58
Figura 41 – Representação do método da superposição de efeitos para a análise da influência de cada gerador de TTH na linha de transmissão. (a) gerador V_{TH1} isolado, (b) gerador V_{TH2} isolado.	59
Figura 42 – Linha de transmissão monofásica de comprimento d e terminal receptor em curto-circuito com representação fasorial de tensões e correntes nos terminais.	60
Figura 43 – Perfil de tensão de uma linha de meio comprimento de onda com terminal receptor em curto-circuito.	62
Figura 44 – Diagrama unifilar para estudo da influência do gerador V_{TH1} na LT de comprimento $d=600$ km.	63
Figura 45 – Perfil de tensão na linha de transmissão de aproximadamente meio comprimento de onda da componente de 180 Hz. Gráficos plotados a partir da equação do perfil de tensão e das medições em pontos da linha simulada no software Simulink.....	64
Figura 46 – Diagrama unifilar de uma linha de comprimento d para estudo do efeito causado pelo gerador V_{TTH1} isolado na presença de impedância Z_{carga} no centro-estrela do transformador receptor.	65
Figura 47 – Perfis de tensão da componente de TTH gerada por V_{TH1} ao longo da linha de 600 km com carga Z_{carga} no centro-estrela do transformador receptor.....	65
Figura 48 – Perfis de tensão de ambos os geradores de terceira harmônica de maneira separada e em conjunto.	67
Figura 49 – Linha de transmissão monofásica de comprimento d com retorno pelo solo.	73
Figura 50 – Modelo π -nominal.....	74
Figura 51 – Representação de um elemento infinitesimal de uma linha de transmissão.	75

Figura 52 – Linha de transmissão de comprimento d e ponto de referência no terminal receptor.	78
Figura 53 – Linha de transmissão sem perdas.	80
Figura 54 – (a) Linha de transmissão ideal. (b) Rede de impedâncias equivalentes.	82
Figura 55 – Modelo simplificado de Bergeron com inclusão de resistências concentradas para várias secções de linha.	84
Figura 56 – Linha de transmissão genérica de comprimento d com representação fasorial.	86
Figura 57 – Linha de transmissão de comprimento d com representação fasorial e presença de ponto x genérico.	89
Figura 58 – Linha de transmissão de comprimento d representada por dois segmentos.	89
Figura 59 – Tensão de pico em função da distância do gerador dada em graus eléctricos.	91
Figura 60 – Perfil de tensão de uma linha de meio comprimento de onda com terminal receptor em curto-circuito.	92

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	11
1.1	OBJETIVOS DA DISSERTAÇÃO.....	12
1.2	ORGANIZAÇÃO DO TEXTO	12
2	TÉCNICAS CONVENCIONAIS DE RECAPACITAÇÃO DE LINHAS DE TRANSMISSÃO	14
2.1	ELEVAÇÃO DA TENSÃO DE TRANSMISSÃO.....	14
2.2	ELEVAÇÃO DA ALTURA DA LINHA DE TRANSMISSÃO	15
2.2.1	Nip & Tuck	16
2.2.2	Substituição de elementos estruturais.....	17
2.2.3	Adição de extensões ao topo das torres de transmissão.....	18
2.2.4	Adição de torres intermediárias entre vãos.....	18
2.2.5	Elevação de estruturas.....	18
2.3	AUMENTO DA SECÇÃO DOS CABOS CONDUTORES.....	19
2.4	SUBSTITUIÇÃO DE CABOS CONDUTORES POR CABOS DE ALTA TEMPERATURA E MENOR VALOR DE FLECHA	20
2.5	MAXIMIZAÇÃO DA CORRENTE DA LINHA	21
2.6	INJEÇÃO DE TENSÃO DE TERCEIRA HARMÔNICA	23
3	RECAPACITAÇÃO DE LINHAS DE TRANSMISSÃO POR MEIO DE INJEÇÃO DE COMPONENTE DE TERCEIRA HARMÔNICA	25
3.1	DESCRIÇÃO QUALITATIVA DO MÉTODO DE RECAPACITAÇÃO.....	25
3.2	INFLUÊNCIA DA COMPONENTE DE TERCEIRA HARMÔNICA NAS TENSÕES DE FASE	26
3.3	INFLUÊNCIA DO DEFASAMENTO ANGULAR ENTRE COMPONENTES FUNDAMENTAIS E TTH NA TENSÃO DE FASE RESULTANTE.....	34
3.4	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	37
4	DESEMPENHO DO MÉTODO DE RECAPACITAÇÃO BASEADO NA INJEÇÃO DE TTH LEVANDO EM CONSIDERAÇÃO A NATUREZA DISTRIBUÍDA DOS PARÂMETROS DE LINHAS DE TRANSMISSÃO	38
4.1	DESCRIÇÃO DO SISTEMA ANALISADO.....	38
4.2	ANÁLISE DO SISTEMA DURANTE A ENERGIZAÇÃO DA LINHA	41

4.3	ANÁLISE EM REGIME PERMANENTE	43
4.3.1	Linha de Transmissão de 100 km	44
4.3.2	Linha de Transmissão de 200 km	45
4.3.3	Linha de Transmissão de 300 km	47
4.3.4	Linha de Transmissão de 400 km	48
4.3.5	Linha de Transmissão de 500 km	49
4.3.6	Linha de Transmissão de 600 km	50
4.3.7	Linha de Transmissão de 700 km	52
4.3.8	Linha de Transmissão de 1000 km	53
4.4	CONSIDERAÇÕES ACERCA DA COMPONENTE DE TTH	55
4.5	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	56
5	EXPLICAÇÃO DO FENÔMENO DE SOBRETENSÕES QUE OCORREM EM LINHAS RECAPACITADAS PELO MÉTODO DE INJEÇÃO DE TTH	58
5.1	DESCRIÇÃO MATEMÁTICA DA INFLUÊNCIA DE CADA GERADOR DE TTH NA LINHA DE TRANSMISSÃO	58
5.2	A TEORIA DE LINHAS DE MEIO COMPRIMENTO DE ONDA EM RELAÇÃO À LINHA ESTUDADA	63
5.3	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	67
6	CONCLUSÃO	68
	REFERÊNCIAS	70
	APÊNDICE A – DESCRIÇÃO MATEMÁTICA DE LINHAS DE TRANSMISSÃO	73
A.1	Equações de propagação de ondas de tensão e corrente em linhas de transmissão	73
A.2	Equações de tensão e corrente em linhas de transmissão no domínio da frequência..	76
	APÊNDICE B – MODELO DE LINHAS DE TRANSMISSÃO A PARÂMETROS DISTRIBUÍDOS	80
B.1	O Modelo de Bergeron.....	80
	APÊNDICE C – LINHAS DE TRANSMISSÃO DE MEIO COMPRIMENTO DE ONDA	85
C.1	Relações fundamentais de comprimento de onda e comprimento elétrico.....	85
C.2	Equações Hiperbólicas Aplicadas a Linhas de Meio Comprimento de Onda.....	86
C.3	Considerações Finais	93

1 INTRODUÇÃO

Em um país emergente, a expansão da indústria, o crescimento demográfico e a ascensão socioeconômica da população se traduzem em um aumento na demanda energética, que deve ser acompanhada por um aumento na potência gerada pelas concessionárias de energia elétrica. Entretanto, deve-se levar em consideração que o aumento da geração de energia elétrica exige um maior esforço por parte dos condutores que a transportam. Logo, esse aumento deve ocorrer simultaneamente com a melhoria das linhas de transmissão, responsáveis pelo transporte dessa energia até os centros consumidores.

A construção de novas linhas de transmissão para atender o aumento da demanda energética, muitas vezes, torna-se uma iniciativa inconveniente devido ao requerimento de licenças ambientais e pagamentos de indenizações por expropriações de faixas de servidão, além dos altos custos de manutenção das estruturas. Dessa forma, o aprimoramento das estruturas existentes se mostra mais vantajoso na maioria das vezes. À essa técnica dá-se o nome de recapacitação de linhas de transmissão (OLIVEIRA, 2000).

O problema envolvido no aumento da potência transmitida por um condutor se dá por meio do aumento de corrente elétrica nesse meio, que ocasiona um aumento de temperatura no material devido ao efeito Joule. Assim, deve-se atentar nos projetos para a ampacidade dos cabos condutores. Define-se ampacidade como sendo a capacidade máxima de corrente que um condutor pode suportar sem que haja mudanças em sua estrutura física devido ao aumento de temperatura.

A literatura apresenta diversos métodos para elevar a ampacidade de uma linha de transmissão. Algumas técnicas envolvem a substituição dos cabos condutores das estruturas antigas por cabos que suportem maiores temperaturas. Também existe a opção de aumentar o número de condutores para uma mesma fase, distribuindo a corrente transmitida e exigindo menor esforço elétrico de cada condutor. Há também a opção de se elevar a altura das linhas de transmissão, de modo a ampliar a distância condutor-solo. Dessa forma, mesmo que a linha sofra dilatação térmica, a distância condutor-solo mínima exigida por normas de segurança ainda é respeitada.

A técnica de recapacitação analisada nesta dissertação consiste na injeção de uma tensão de terceira harmônica em um sistema trifásico para que haja diminuição do valor de pico das tensões de fase por meio de distorção harmônica. Com a redução do valor de pico das tensões de fase é possível elevar o valor de tensão da linha de transmissão em até 15,5% sem que o limite do valor de pico ultrapasse o valor limite especificado para a linha de transmissão. O método possui a

vantagem de ser um procedimento que pode ser considerado puramente elétrico, não havendo necessidade de mudanças na estrutura física das linhas de transmissão para fins de aplicabilidade. Essa técnica de recapacitação foi proposta por Alaei e Khajehoddin (2017). No artigo, os autores não consideram a natureza distribuída dos parâmetros de linhas de transmissão, essa consideração é necessária para que possa realizar uma análise detalhada do comportamento ondulatório das tensões e correntes em qualquer ponto da linha, tanto em regime permanente quanto para estudos de transitórios eletromagnéticos.

1.1 OBJETIVOS DA DISSERTAÇÃO

Esta dissertação tem como objetivo realizar um estudo sobre o método de recapacitação por injeção de tensão de terceira harmônica (TTH) através de um modelo de representação de linhas de transmissão a parâmetros distribuídos. O modelo em questão permite a divisão de uma linha de transmissão em segmentos, que torna possível o estudo do comportamento das tensões ao longo de sua extensão. O método de injeção de TTH será analisado em regimes transitório e permanente em linhas de transmissão com diferentes comprimentos e, para cada caso, será feita a comparação entre uma linha convencional e uma linha recapacitada pelo método. Também será feito um estudo do comportamento da TTH de maneira isolada para melhor compreensão dos fenômenos decorrentes da inserção dessa componente no sistema.

1.2 ORGANIZAÇÃO DO TEXTO

No Capítulo 2 são apresentadas técnicas de recapacitação comumente utilizadas por concessionárias de energia elétrica. Ao final do capítulo, a técnica utilizada neste trabalho também é apresentada.

No Capítulo 3, a técnica de recapacitação por injeção de TTH é analisada gráfica e matematicamente, mostrando as vantagens, limitações e soluções propostas pelos autores da técnica.

No Capítulo 4 são apresentados os resultados das análises da técnica de recapacitação em estudo feitas por meio de um modelo de linhas de transmissão a parâmetros distribuídos. As análises foram realizadas para diversos comprimentos de linha de transmissão, tanto na presença quanto na ausência da componente de terceira harmônica para fins de comparação.

No Capítulo 5 são apresentadas análises quanto ao comportamento isolado da componente de terceira harmônica no sistema, isto é, sem a presença do gerador trifásico e da carga. As análises

são desenvolvidas sobre uma linha de 600 km por se comportar como uma linha de meio comprimento de onda em relação à componente de 180 Hz.

No Capítulo 6 apresenta-se as conclusões do estudo realizado.

No Apêndice A é feita a demonstração das equações diferenciais da linha de transmissão e sua solução no domínio da frequência.

No Apêndice B o modelo de Bergeron com e sem perdas é apresentado.

No Apêndice C apresenta-se de maneira sucinta a teoria sobre o comportamento das tensões em linhas de meio comprimento de onda.

6 CONCLUSÃO

Esta dissertação apresentou um estudo sobre o método de recapacitação de linhas de transmissão proposto por Alaei e Khajehoddin (2017), que consiste na injeção de tensão de terceira harmônica (TTH) com objetivo de reduzir a amplitude das tensões e fase e permitir a transmissão de uma potência superior sem a necessidade de alterações na estrutura de uma LT. No artigo em que o método foi proposto, os autores realizaram análises de linhas de transmissão apenas nos terminais da estrutura, o que se mostrou suficiente para estudos sobre estabilidade, fluxo de carga e demais análises realizadas pelos autores acerca do método desenvolvido. Nesta dissertação foi apresentado um estudo sobre o comportamento das tensões de fase ao longo de linhas com vários comprimentos, tanto em regime transitório quanto permanente na presença e na ausência de TTH. Para tanto, foi utilizado o modelo de linha de transmissão a parâmetros distribuídos de Bergeron. Com esse modelo foi possível dividir a linha em várias seções que viabilizaram as análises em vários pontos ao longo de sua extensão.

O estudo realizado sobre a energização da linha recapitada pelo método propriamente dito mostrou que o tempo de amortecimento das tensões de fase é maior na presença da componente de terceira harmônica quando comparado com uma linha convencional. Uma maneira de diminuir a duração das oscilações transitórias consiste no ajuste adequado dos parâmetros dos transformadores, alternativa que pode ser considerada nos projetos de recapacitação, mas que se manteve fora do escopo deste trabalho.

A análise em regime permanente permitiu verificar que linhas de comprimento até 200 km com injeção de TTH apresentam a redução na tensão de pico em um fator de 0,867, como esperado teoricamente pelo método. A linha de 300 km, no entanto, apresentou valores de tensão superiores a 0,867 p.u. nos pontos analisados fora dos terminais, chegando a 0,900 p.u., o que limitaria o aumento de tensão da linha em 11,1% ante os 15,5% esperados teoricamente. Foi constatado no estudo que esse aumento de tensão ao longo da linha é causado pela componente de terceira harmônica, que sofre variações no pico de tensão em função de seu comprimento elétrico e da interação entre os dois geradores de TTH injetados no sistema. Em linhas mais longas, esse problema torna-se mais acentuado, fazendo com que a tensão de fase resultante tenha valores de pico superiores ao limite de 1 p.u. da estrutura, o que tornaria o método de recapacitação inviável.

O caso de sobretensão mais crítico estudado foi o da LT de comprimento 600 km, que equivale a uma linha de meio comprimento de onda em relação às componentes de 180 Hz. No

caso particular da LT de 1000 km as tensões de fase ao longo da estrutura também apresentaram níveis mais elevados do que de uma linha convencional, mesmo com a componente de terceira harmônica se mantendo na faixa de amplitude considerada ideal, esse resultado permitiu comprovar que o problema de dispersão de sinal ainda é recorrente, mesmo com o uso do método de recapacitação por injeção de TTH para linhas longas.

Diante dos resultados obtidos ao longo deste trabalho, conclui-se que o método de recapacitação por injeção de TTH funciona de maneira esperada em LTs de comprimento até 200 km. Em linhas mais longas, no entanto, o método necessita de estudos mais aprofundados para sua viabilidade, tendo em vista que os problemas de sobretensão causados pelo comprimento elétrico da componente de 180 Hz e pela dispersão de sinal persistem nesses casos.

REFERÊNCIAS

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 5422/1985**: projeto de linhas aéreas de transmissão de energia elétrica. Rio de Janeiro, 1985. p. 57. Relatório Técnico.
- ALAEI, R.; KHAJEHODDIN, S. A. The operation of a power transmission line with injected third harmonic voltage. **IEEE Transactions on Power Delivery**, New York, v. 32, n. 1, p. 226-233, 2017.
- ALBIZU, I.; MAZÓN, A. J.; ZAMORA, I. Methods for increasing the rating of overhead lines. In: IEEE RUSSIA POWER TECH, 6, 2005, St. Petersburg. **Anais...** St. Petersburg: IEEE, 2005. p. 1-6.
- BARTHOLD, L. O.; DOUGLASS, D. E.; WOODFORD, D. A. Maximizing the capability of existing AC transmission lines. In: CIGRÉ, 42., 2008, Canadá. **Anais...** Canadá: CIGRÉ, 2008. Disponível em: <http://www.e-cigre.org>. Acesso em: 20 set. 2017
- BELANGER, M. E.; LUSZCZKI, G. E. Nip/Tuck method a solution to providing additional conductor-to-ground clearances for transmission lines. In: TRANSMISSION AND SUBSTATION DESIGN AND OPERATION SYMPOSIUM – TSDOS, 46., 2013, Addison. **Anais...** Maine: Augusta, 2013. p. 11-13.
- BHATTARAI, R. *et al.* Voltage uprating of overhead transmission lines. In: INTERNATIONAL UNIVERSITIES POWER ENGINEERING CONFERENCE – UPEC, 45., 2010, Cardiff. **Anais...** Cardiff: IEEE, 2010. p. 1-6.
- BOYCE, W. E.; DIPRIMA, R. C. **Equações diferenciais elementares e problemas de valores de contorno**. 10. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2015.
- BRAGA, G. E. *et al.* **Recapacitação de linhas aéreas de transmissão existentes utilizando cabos condutores especiais de altas temperaturas de operação e baixa flecha**. Belo Horizonte: CEMIG, 2007.
- BRUNKER, S. W. Aerial LiDAR for overhead transmission lines-Lessons from the USA in realising benefit and value. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON POWER SYSTEM TECHNOLOGY – POWERCON, 23., 2016, Wollongong. **Anais...** Red Hook: IEEE, 2016.
- BUDNER, A. Introduction of Frequency-Dependent Line Parameters into an Electromagnetic Transients Program. **IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems**, New York, v. PAS-89, n. 1, p. 88-97, 1970.
- CAVASSIN, R. S.; FERNANDES, T. S. P. Uma abordagem multicritérios para recapacitação de linhas de transmissão. **Sba: Controle & Automação Sociedade Brasileira de Automática**, Curitiba, v. 23, n. 6, p. 749-765, 2012.

CHAPUT, L. J. **Understanding the benefits of LiDAR data**. New York: EIJ, 2012. Disponível em: <http://ejournal.com/print/articles/understanding-the-benefits-of-lidar-data>. Acesso em: 29 abr. 2018.

CIGRÉ. Working group SC 22-12 Cigré (Chairman R. Stephen): probabilistic determination of conductor current ratings. **ELECTRA**, Canada, v. 164, n. 8, p. 103–17, 1996.

COSTA, E. C. M. *et al.* Efficient procedure to evaluate electromagnetic transients on three-phase transmission lines. **IET generation, transmission & distribution**, London, v. 4, n. 9, p. 1069–1081, 2010.

DA SILVA, A. A. P.; DE BARROS BEZERRA, J. M. A model for upgrading transmission lines by using HTLS conductors. **IEEE Transactions on Power Delivery**, New York, v. 26, n. 4, p. 2180–2188, 2011.

DAS, J. C. **Understanding symmetrical components for power system modelling**. New Jersey: John Wiley & Sons, 2016.

DOMMEL, H. W. **Electromagnetic transients program theory book**. Vancouver: BPA, 1987, 483 p.

DOMMEL, H. W. Electromagnetic transients in single- and multiphase networks. **IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems**, New York, v. PAS-88, n. 4, p. 338–399, 1969.

DOUGLASS, D. A. *et al.* Dynamic thermal ratings realize circuit load limits. **IEEE Computer Applications in Power**, New Jersey, v. 13, n. 1, p. 38–44, 2000.

FUCHS, R. D. **Transmissão de energia elétrica**. Rio de Janeiro: Escola Federal de Engenharia de Itajubá, 1977.

GLOVER, J. D.; SARMA, M. S.; OVERBYE, T. J. **Power Systems analysis and design**. 5. ed. Estados Unidos: Cengage Learning, 2011.

GOMES, L. C. F.; DA SILVA, L. C. P.; TAVARES, M. C. Half-wavelength transmission lines for connecting power plants in Amazon region to the Brazilian system. In: GRENOBLE CONFERENCE POWERTECH, POWERTECH, 10, 2013, Grenoble. **Anais...** Grenoble: IEEE, 2013. p. 1–6.

HOULDSWORTH, J. A.; GRANT, D. A. The use of harmonic distortion to increase the output voltage of a three-phase PWM inverter. **IEEE Transactions on Industry Applications**, New York. v. 20, n. 5, p. 1224–1228, 1984.

HSIEH, G. C.; HUNG, J. C. Phase-locked loop techniques - a survey. **IEEE Transactions on Industrial Electronics**, New York, v. 43, n. 6, pp 609–615, 1996.

INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONIC ENGINEERS – IEEE. **Std 738-2006**: IEEE standard for calculating the current-temperature relationship of bare overhead conductors. Relatório Técnico. 2007. p. c1-59

MAMIŞ, M. S.; KAYGUSUZ, A.; KÖKSAL, M. State variable distributed-parameter representation of transmission line for transient simulations. **Turkish Journal of Electrical Engineering & Computer Sciences**, Turkey, v. 18, n. 1, p. 31-42, 2010.

MOLBURG, J. C.; KAVICKY, J.; PICEL, K. **The design construction, and operation of long-distance high-voltage electricity transmission technologies**. Argonne: Argonne National Lab - ANL, 2008. Relatório Técnico.

OLIVEIRA, C. C. B. de *et al.* **Introdução a sistemas elétricos de potência**. 2. ed. São Paulo: Blucher, 2000.

OLIVEIRA, C. M. F. DE. **Recapitação de linhas de transmissão**. 2000. 101 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Pontifícia Universidade Católica, Rio de Janeiro, 2000.

PYTLAK, P.; MUSILEK, P. Selective upgrading of transmission lines using DTCR. In: CANADIAN CONFERENCE ON ELECTRICAL AND COMPUTER ENGINEERING: VISION FOR A GREENER FUTURE - CCECE, 25., 2012, Canadá. **Anais...** Cadaná: IEEE 2012. p. 1-4.

REISDORFF, B. Increasing transmission capacity case studies and techniques: Increased transmission capacity by increasing ground clearance: a manufacturers perspective. In: PROCEEDINGS OF THE IEEE INTERNATIONAL CONFERENCE ON TRANSMISSION AND DISTRIBUTION CONSTRUCTION AND LIVE LINE MAINTENANCE – ESMO, 11., 2006, Albuquerque. **Anais...** Providence: IEEE, 2006. p. 1-7.

SHENKMAN, A. L.; ZARUDI, M. **Circuit analysis for power engineering handbook**. New York: Springer Science & Business Media, 2012.

SOUZA, J. T. de. **Análise do sistema de transmissão em meia onda integrado ao sistema interligado nacional**. 2011. 111 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Escola Politécnica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2011.

STEVENSON, W. D. J. **Elementos de análise de sistemas de potência**. São Paulo: McGraw Hill, 1986. ISBN 86-0551.

ZANETTA, L. C. **Transitórios eletromagnéticos em sistemas de potência**. São Paulo: EdUSP, 2003. v. 52, p. 720.