

MODELO DE LINHAS DE TRANSMISSÃO COM DIFERENTES ESTRUTURAS BÁSICAS APLICADAS EM SIMULAÇÕES DE TRANSITÓRIOS ELETROMAGNÉTICOS

LUIS H. JUS, AGHATTA C. MOREIRA, MELISSA O. SANTOS, THAINÁ G. PEREIRA, AFONSO J. PRADO, ELMER M. GENNARO

Engenharia de Telecomunicações, UNESP – Univ. Estadual Paulista
Av. Profª Isette Corrêa Fontão, 505, Jardim das Flores, CEP 13876-750, São João da Boa Vista, SP, Brasil
rodrigo_jus@terra.com.br, aghattamoreira@gmail.com, santos.melloliveira@gmail.com,
thainaguimaraes16@hotmail.com, afonsojp@uol.com.br, elmer.gennaro@sjbv.unesp.br

JOSÉ PISSOLATO FILHO

Departamento de Sistemas e Energia, DSE/FEEC/UNICAMP – Universidade Estadual de Campinas
Av. Albert Einstein, 400, Distrito Barão Geraldo, CEP 13083-852, Campinas, SP, Brasil
pisso@dsce.fee.unicamp.br

Abstract— Models based on lumped elements are simple ones to represent systems composed by distributed parameters when models with lumped elements use a lot of these elements. However, such mentioned models usually present numerical problems because it is subject to the influence of numerical oscillations. When introducing new elements, such as damping resistors, in the mentioned models, the numerical oscillations can be minimized. The introduction of new elements increases the computational time for the analysis and simulations with the modified model. Thus, by applying π circuit cascades, simulations with abrupt changes in voltage or current are carried out using two different structures of π circuits with the purpose to achieve a similar accuracy and less computational time than those obtained with application damping resistor in every π circuit units.

Keywords— Eigenvalues and eigenfuctions, linear systems, numerical analysis, power system transient simulation, state space methods, time-domain analysis, transmission line modeling.

Resumo— Modelos baseados em elementos concentrados constituem a maneira mais simples de representar sistemas constituídos por parâmetros distribuídos quando é utilizada uma grande quantidade desses elementos concentrados. No entanto, tal modelagem apresenta, geralmente, problemas numéricos, pois é sujeita à influência de oscilações numéricas. Ao introduzir novos elementos, tais como resistências de amortecimento, nos modelos mencionados, as oscilações podem ser minimizadas. A introdução de novos elementos causa o aumento do tempo computacional para a realização de análises e simulações com o modelo modificado. Assim, ao aplicar cascatas de circuitos π em simulações com alterações bruscas de tensão ou corrente, são utilizadas duas estruturas diferentes de circuitos π com a finalidade de atingir uma precisão similar e um tempo computacional menor do que aqueles obtidos com aplicação da resistência de amortecimento em todas as unidades de circuitos π .

Palavras-chave— Autovalores e autovetores, sistemas lineares, análise numérica, simulação de transitórios em sistemas de potência, métodos de espaço de estado, análise no domínio do tempo, modelo de linha de transmissão.

1 Introdução

Em análises de redes elétricas submetidas a fenômenos transitórios, modelos no domínio do tempo e dependentes da frequência são considerados bastante eficientes e precisos para esse tipo de aplicação. Mesmo assim, ainda se busca otimização para tais modelos, pois ainda restam pontos cruciais em relação à precisão e eficiência. Considerando tais pontos e situações mais simples, tais como aplicações de matrizes de transformação constantes ou até mesmo modelos baseados em parâmetros constantes em relação à frequência, há a possibilidade de minimizar a influência de oscilações numéricas nos resultados obtidos introduzindo modificações estruturais nos circuitos utilizados para modelar sistemas ou redes elétricas. Assim, ao considerar a representação simplificada de uma linha de transmissão por meio de cascatas de circuitos π , sendo que a solução de tal sistema é realizada com aplicação da integração trapezoidal, os resultados, principalmente aqueles rela-

cionados a alterações bruscas de tensão ou de corrente no sistema, ficam contaminados por oscilações numéricas ou oscilações de Gibbs. A introdução de resistências em paralelo com os elementos em série dos circuitos π , ou elementos que representam os parâmetros longitudinais da linha de transmissão, pode levar à minimização das oscilações numéricas mencionadas. A incorporação de mais um elemento em cada circuito π da cascata utilizada, no entanto, aumenta o tempo computacional para realização de simulações e análises com o modelo mencionado.

Considerando a aplicação alternada da resistência de amortecimento nos circuitos π de uma cascata desses elementos utilizada para representar de forma simplificada uma linha de transmissão, são feitas análises quanto à precisão e ao tempo computacional em comparação com os resultados obtidos pela aplicação da resistência de amortecimento em todos os circuitos π da cascata mencionada. Tais análises são baseadas em entradas de tensão em degrau e as respectivas saídas de tensão da linha modelada. No caso, as comparações realizadas são baseadas em gráfi-

cos de tensão em função do tempo e em gráficos tridimensionais que estabelecem a relação dos picos de tensão com o número de circuitos π e a resistência de amortecimento durante a primeira reflexão de onda de tensão no terminal de saída em aberto.

2 A integração trapezoidal e modelos de circuitos π

A integração trapezoidal é um método numérico de integração baseado na transformação de equações diferenciais em equações algébricas equivalentes. O valor da integral é aproximado pela área de uma função de primeiro grau ou a área de um trapézio tomando como extremos os pontos em que a função aproximada intercepta a função de primeiro grau. Para melhorar a precisão da aproximação um intervalo maior da variável independente pode ser subdividido em parcelas menores e, geralmente iguais, denominadas passos de integração (Fig. 1) (Campos, 2001; Dommel, 1984).

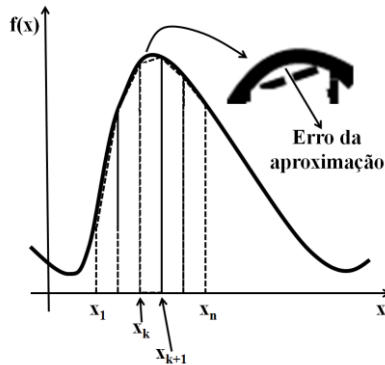


Figura 1. Integração numérica aplicando método trapezoidal.

Aplicando o método trapezoidal, obtém-se:

$$\int_{x(k)}^{x(k+1)} f(x) dx \approx \frac{\Delta x}{2} [f(x_{k+1}) + f(x_k)] \quad (1)$$

Se o ponto y_k no eixo vertical corresponde a $f(x_k)$ e y_{k+1} para $f(x_{k+1})$, a integração trapezoidal leva a:

$$y_{k+1} = y_k + \frac{\Delta x}{2} [f(x_k) + f(x_{k+1})] \quad (2)$$

$$\int_{x(k)}^{x(k+1)} f(x) dx \approx y_{k+1} - y_k = \Delta y$$

O passo de integração é:

$$\Delta x = x_{k+1} - x_k \quad (3)$$

No próximo item, este método numérico é aplicado em simulações de transitórios usando unidades com e sem resistência de amortecimento.

3 Modelo de linha de transmissão

Ao analisar propagação das ondas em linhas de transmissão, tais sistemas são decompostos em partes infinitesimais que podem ser representadas por circuitos π . Há necessidade de utilizar uma cascata com grande quantidade de circuitos π e tal cascata consis-

te de três tipos diferentes de circuitos π : o circuito que representa o terminal de alimentação da linha, os circuitos intermediários e o circuito que representa o terminal de saída da linha. Na Fig. 2, a unidade intermediária é representada (Nelms, 1989; Macías, 2005; Macías, 2005a; Mamis, 1999; Mamis, 2000; Prado, 2014; Chrysochos, 2015; Dommel, 1984, Brandão Faria, 1997; Brandão Faria, 1997a).

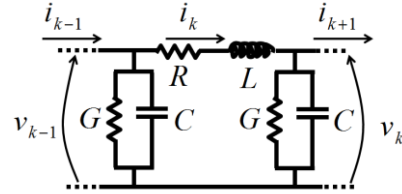


Figura 2. Unidade de circuito π .

Tensões de malha e correntes de nó levam a:

$$\frac{di_k}{dt} = \dot{i}_k = \frac{1}{L}(v_{k-1} - R \cdot i_k - v_k) \quad (4)$$

$$\frac{dv_k}{dt} = \dot{v}_k = \frac{1}{C}(i_k - G \cdot v_k - i_{k+1}) \quad (5)$$

Cada circuito π é descrito por duas variáveis de estado (tensão e corrente). Dessa forma, considerando uma cascata com n circuitos π , são obtidas as seguintes relações:

$$\dot{x} = [A]x + [B]u \quad B = \begin{bmatrix} 1/L & 0 & \dots & 0 \end{bmatrix}^T$$

$$x_{2n} = \begin{bmatrix} i_1 & v_1 & i_2 & v_2 & \dots & i_n & v_n \end{bmatrix}^T \quad (6)$$

A matriz A é baseada em (4) e (5) e a estrutura é:

$$A = \begin{bmatrix} -R/L & -1/L & 0 & \dots & \dots & 0 \\ 1/C & -G/C & -1/C & \ddots & \ddots & \vdots \\ 0 & \ddots & \ddots & \ddots & \ddots & \vdots \\ \vdots & \ddots & 1/C & -G/C & -1/C & 0 \\ \vdots & \ddots & \ddots & 1/L & -R/L & -1/L \\ 0 & \dots & \dots & 0 & 1/C & -G/C \end{bmatrix} \quad (7)$$

A resistência de amortecimento produz a modificação mostrada na Fig. 3 e as novas relações de tensão e corrente em um circuito π estão em (8) e (9).

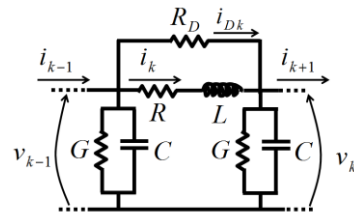


Figura 3. Circuito π com resistência de amortecimento.

$$\dot{i}_k = \frac{v_{k-1} - R \cdot i_k - v_k}{L} \quad (8)$$

$$\dot{v}_k = \frac{i_k - (2G_D + G)v_k + G_D(v_{k-1} + v_{k+1}) - i_{k+1}}{C} \quad (9)$$

A resistência de amortecimento é calculada por (10) (Chrysochos, 2015) e o fator proporcional k_D é inteiro. A introdução de R_D leva a alterações na estrutura de matriz A mostradas em (11), (12) e (13). Os outros elementos permanecem iguais àqueles em (7).

$$R_D = k_D \frac{2L}{\Delta t} \leftrightarrow G_D = \frac{1}{R_D} \quad (10)$$

$$A_{kk} = \frac{-(2G_D + G)}{C}, \quad k \text{ é par} \quad (11)$$

$$A_{k(k-2)} = A_{k(k+2)} = \frac{G_D}{C}, \quad k \text{ é par} \quad (14)$$

$$A_{2n(2n-2)} = \frac{G_D}{C}, \quad A_{2n \ 2n} = \frac{-2G_D + G}{C} \quad (15)$$

Os valores de R, L, G e C são calculados por:

$$\begin{aligned} R &= R' \cdot \frac{d}{n}, & L &= L' \cdot \frac{d}{n}, \\ G &= G' \cdot \frac{d}{n}, & C &= C' \cdot \frac{d}{n} \end{aligned} \quad (16)$$

4 Fluxograma da rotina numérica

O fluxograma que representa a estrutura básica da rotina numérica utilizada para realizar as simulações necessárias para avaliação da proposta deste trabalho é mostrado na Fig. 4.

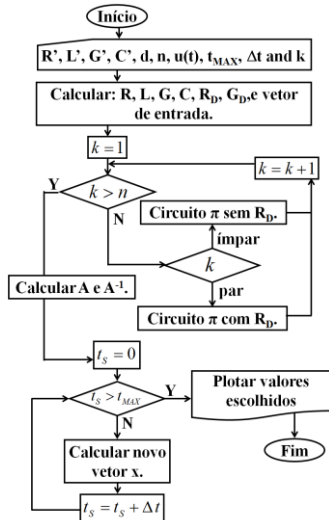


Figura 4. Fluxograma para aplicação do modelagem proposta.

5 Resultados obtidos

Utilizando uma cascata de circuitos π constituída por unidades alternadas com resistência de amortecimento e sem essa resistência, foram feitas simulações para analisar a influência da resistência mencionada na diminuição dos erros numéricos na simulação de transitórios eletromagnéticos em linhas de transmissão. Tomando $k_D = 15$ e $\Delta t = 60$ ns, a quantidade de circuitos π foi variada entre 101 e 551 com um passo de 50. Foram utilizadas quantidades ímpares para garantir que o primeiro e o último circuito π tivessem a resistência R_D . Com 101 circuitos, não houve diminuição significativa das oscilações numéricas nas simulações obtidas. Além disso, o pico de tensão continua atingindo o valor de 2,5 pu. O limite de estabilidade do método numérico, nesse caso, é atingido entre 151 e 251 (Figs. 5 e 6).

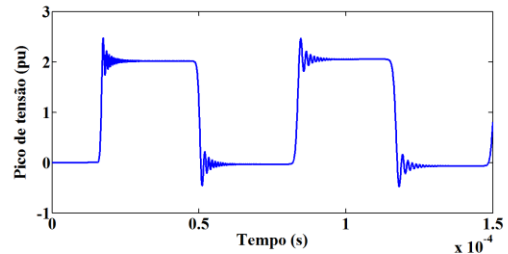


Figura 5. Tensão de saída, $k_D = 15$, $\Delta t = 60$ ns, $n = 151$.

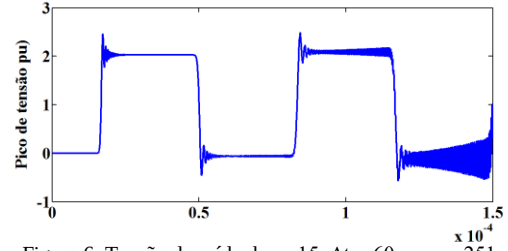


Figura 6. Tensão de saída, $k_D = 15$, $\Delta t = 60$ ns, $n = 251$.

O número de circuitos π , então, foi fixado em 151. Com essa configuração, as oscilações numéricas são estabilizadas mais rapidamente em cada período entre as reflexões de onda nos terminais da linha. Com essa quantidade de circuitos π , o valor de k_D foi variado entre 10 e 50, com passo de 5. Foi constatado que as oscilações numéricas sofrem um maior amortecimento com k_D entre 10 e 20 (Figs. 7 e 8). Considerando essa faixa, a melhor opção é $k_D = 15$ (Fig. 9) devido à concentração das oscilações em um tempo menor em cada período de reflexão da onda analisada.

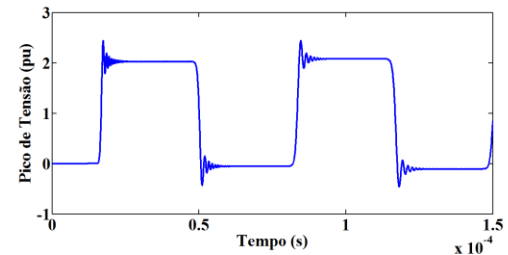


Figura 7. Tensão de saída, $k_D = 10$, $\Delta t = 60$ ns, $n = 151$.

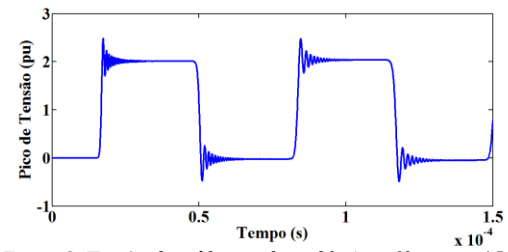


Figura 8. Tensão de saída para $k_D = 20$, $\Delta t = 60$ ns, $n = 151$.

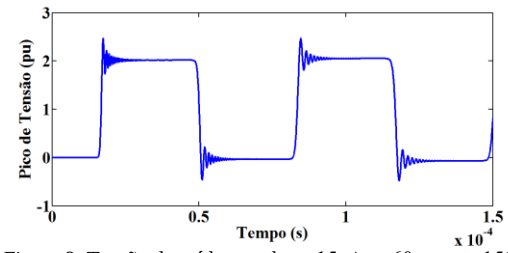


Figura 9. Tensão de saída para $k_D = 15$, $\Delta t = 60$ ns, $n = 151$.

Posteriormente, o número de circuitos utilizado nas simulações foi 201. Ao serem feitas análises dos valores, se $k_D = 15$ (Fig. 10), os resultados continuam apresentando oscilações numéricas mais controladas, porém com $k_D = 10$ (Fig. 11), há instabilidade numérica. Para valores de k_D acima de 20 (Fig. 12), é necessário um tempo maior para amortecimento das oscilações em cada período de reflexão quando comparado com os resultados para $k_D = 15$.

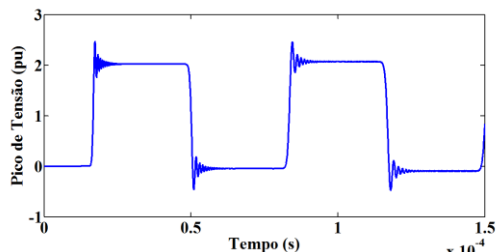


Figura 10. Tensão de saída para $k_D = 15$, $\Delta t = 60$ ns, $n = 201$.

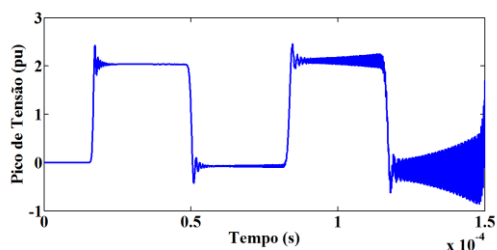


Figura 11. Tensão de saída para $k_D = 10$, $\Delta t = 60$ ns, $n = 201$.

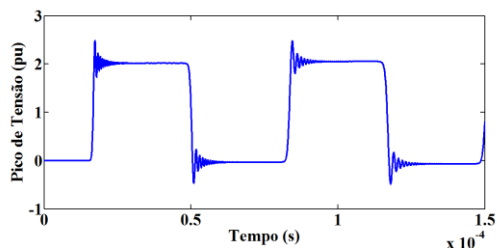


Figura 12. Tensão de saída para $k_D = 20$, $\Delta t = 60$ ns, $n = 201$.

Utilizando um grande número de simulações, foram registrados os valores do pico de tensão durante a primeira reflexão de onda no terminal de saída da linha modelada. Os valores de pico de tensão foram obtidos variando k_D de 10 a 50 e o número de circuitos π de 101 a 401. Os resultados são mostrados em um gráfico tridimensional na Fig. 13.

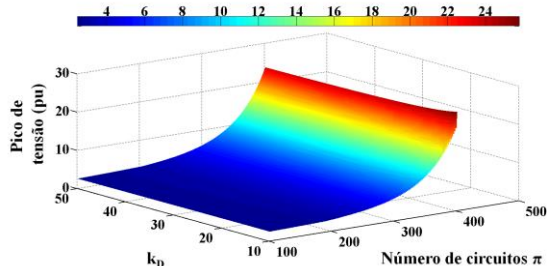


Figura 13. Variação do pico de tensão em função de k_D e da quantidade de circuitos π .

Independentemente de diminuir ou não o tempo computacional necessário para simulações de transitórios, o modelo que considera a aplicação alternada de resistência de amortecimento leva a resultados

inconsistentes e instáveis numericamente. Isso é observado com clareza ao se comparar os resultados apresentados na Fig. 13 com os resultados apresentados na Fig. 14. A Fig. 14 mostra resultados obtidos anteriormente com a aplicação de resistência amortecimento em todos os circuitos π da cascata que representa a linha de transmissão analisada (Conceição, 2016).

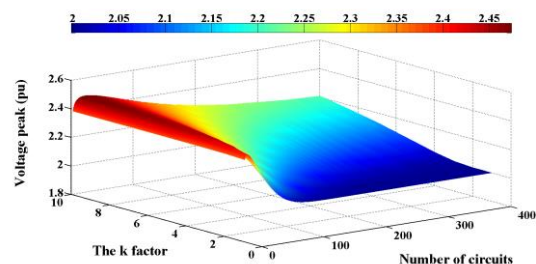


Figura 14. Picos de tensão de saída com aplicação de resistência de amortecimento em todos os circuitos π (Conceição, 2016).

6 Conclusão

Ao modelar linhas de transmissão é modelada usando cascata de circuitos π , no caso de simular a propagação de transitórios eletromagnéticos, os resultados obtidos podem ser altamente influenciados por oscilações de Gibbs. Resultados anteriores obtidos com a introdução de resistência de amortecimento em cada circuito π da cascata utilizada mostram reduções significativas das oscilações numéricas. Essa modificação com a introdução de um novo elemento em cada circuito π causa aumento no tempo computacional necessário para realizar as simulações desejadas. Dessa forma, com o objetivo de manter as reduções das oscilações numéricas e diminuir o tempo computacional, foi proposto um modelo baseado em duas estruturas diferentes de circuito π : uma sem a resistência de amortecimento e outra com tal resistência. Foi composta uma cascata alternando esses dois tipos de circuitos π . No entanto, esse modelo proposto não é adequado, pois os resultados obtidos são numericamente instáveis para determinados valores de resistência de amortecimento e determinadas quantidades de circuitos π . Quando não há instabilidades numéricas, a redução das oscilações numéricas não se estende por todo perfil da onda de tensão simulada. Portanto, a utilização de resistência de amortecimento em todos circuitos π ainda é uma opção melhor do que o modelo proposto neste trabalho.

Agradecimentos

Esta pesquisa tem apoio financeiro da FAPESP, Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo, por meio do processo 2015/21390-7.

Referências Bibliográficas

Brandão Faria, J. A.; Briceño Mendez, J. (1997),

- “Modal analysis of untransposed bilateral three-phase lines - a perturbation approach”, IEEE Trans. on Power Delivery, vol. 12, no. 1, January 1997.
- Brandão Faria, J. A.; Briceño Mendez, J. (1997a), “On the modal analysis of asymmetrical three-phase transmission lines using standard transformation matrices”, IEEE Trans. on Power Delivery, vol. 12, no. 4, October 1997
- Campos, F. F. (2001), Algoritmos numéricos, 2ª edição, LTC – Livros Técnicos e Científicos, Rio de Janeiro, RJ.
- Chrysoschos, A. I.; Tsolaridis, G. P.; Papadopoulos, T. A.; Papagiannis, G. K. (2015), “Damping of oscillations related to lumped-parameter transmission line modeling”, International Conference on Power Systems Transients (IPST2015), 7 pp., Cavtat, Croatia, June 15-18, 2015.
- Conceição, K. O.; Besspalhuk, K. J.; Silva, B. F.; Cargnin-Stieler, M.; Prado, A. J.; Gennaro, E. M.; Pissolato Filho, J. (2016), “Minimization of Gibb’s Oscillations in Transients’ Simulations using Damping Resistance”, SBSE 2016 – Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos, Natal, RN, 22 a 25 de maio de 2016.
- Dommel, H. W. (1984), Electromagnetic Transients Program - Rule Book, Oregon.
- Gustavsen, B. (2103), “Avoiding numerical instabilities in the universal line model by a two-segment interpolation schene”, IEEE Trans. on Power Delivery, vol. 28, no. 3, July 2013.
- Gustavsen, B.; Semlyen, A. (1998), “Combined phase and modal domain calculation of transmission line transients based on vector fitting”, IEEE Trans. on Power Delivery, vol. 13, no. 2, April 1998.
- Macías, J. A. R.; Expósito, A. G.; Soler, A. B. (2005), “A comparison of techniques for state-space transient analysis of transmission lines”, IEEE Trans. on Power Delivery, vol. 20, no. 2, pp. 894-903, April, 2005.
- Macías, J. A. R.; Expósito, A. G.; Soler, A. B. (2005a), Correction to “A comparison of techniques for state-space transient analysis of transmission lines”, IEEE Trans. on Power Delivery, vol. 20, no. 3, pp. 2358, July, 2005.
- Mamis, M. S.; Koksai, M. (1999), “Transient analysis of nonuniform lossy transmission lines with frequency dependent parameters”, Electric Power Systems Research, vol. 52, no. 3, pp. 223-228, December, 1999.
- Mamis, M. S.; Koksai, M. (2000), “Solution of eigenproblems for state-space transient analysis of transmission lines”, Electric Power Systems Research, vol. 55, no. 1, pp. 7-14, July, 2000.
- Nelms, R. M.; Sheble, G. B.; Newton, S. R.; Grigsby, L. L. (1989), “Using a personal computer to teach power system transients”, IEEE Trans. on Power Systems, vol. 4, no. 3, pp. 1293-1294, August, 1989.
- Prado, A. J.; Lessa, L. S.; Monzani, R. C.; Bovolato, L. F.; Pissolato Filho, J. (2014), “Modified routine for decreasing numeric oscillations at associations of lumped elements”, Electric Power Systems Research, vol. 112, no. 1, pp. 56-64, July 2014.