

UM PROCEDIMENTO PARA OBTER A MATRIZ ABCD DE LINHAS DE TRANSMISSÃO

JAIMIS S. L. COLQUI¹, SÉGIO KUROKAWA¹, JOSÉ PISSOLATO FILHO²

¹GATE, Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade Estadual Paulista, Campus de Ilha Solteira

²DSE, Departamento de Sistemas e Energia, Universidade Estadual de Campinas

Avenida José Carlos Rossi, 1370, Ilha Solteira, São Paulo

E-mails: jeimis.leon@gmail.com; kurokawa@dee.feis.unesp.br; pisso@dsce.fee.unicamp.br

Abstract— The paper shows an alternative methodology to obtain an ABCD matrix for generic multiphase transmission lines. The proposed procedure starts from the open and short circuit responses of the line calculated by using any classic transmission line model. To verify the accuracy of the proposed procedure, it was used to obtain the ABCD matrix for a typical 440 kV overhead transmission line and the results obtained showed that the approach was correctly developed and it is a simple and efficient procedure to obtain the ABCD matrix for multiphase transmission lines.

Keywords— Transmission line model, phase domain representation, ABCD matrix, electromagnetic transients.

Resumo— O artigo mostra um procedimento alternativo de obtenção da matriz ABCD para linhas de transmissão. O método é baseado nas respostas de circuito aberto e curto circuito da linha, que podem ser obtidas com o uso de modelos clássicos que representam linhas de transmissão em simulações de transitórios eletromagnéticos. Para validar o método proposto, ele foi utilizado para obter a matriz ABCD de uma típica linha trifásica de 440 kV. Os resultados obtidos mostraram que a metodologia foi desenvolvida corretamente, e consiste em um meio simples e eficiente para a obtenção da matriz ABCD para linhas de transmissão.

Palavras-chave— Modelo de linha de transmissão, representação no domínio das fases, matriz ABCD, transitórios eletromagnéticos.

1 Introdução

Uma linha de transmissão é caracterizada por seus parâmetros longitudinais e transversais, que são variáveis em relação à frequência e distribuídos ao longo do comprimento da linha (Marti, 1982). A natureza distribuída dos parâmetros faz com que as correntes e tensões ao longo do comprimento da linha tenham o comportamento de ondas (Semlyen e Gustavsen, 2012), e deve ser levada em consideração em estudos de transitórios eletromagnéticos.

Os modelos de linhas de transmissão utilizados em simulações de transitórios eletromagnéticos podem ser classificados quanto à maneira como são realizadas as simulações e quanto ao modo como é representado o acoplamento entre as fases.

No que diz respeito à maneira como são realizadas as simulações, um modelo de linha pode ser desenvolvido no domínio do tempo ou no domínio da frequência (Gustavsen, 2005). No domínio do tempo, as simulações são realizadas diretamente no domínio do tempo. No entanto, se a linha é representada no domínio da frequência as simulações são realizadas inicialmente no domínio da frequência e, após o término da simulação, os resultados são convertidos por meio de métodos numéricos para o domínio do tempo utilizando a transformada inversa de Laplace.

Para levar em conta o acoplamento entre as fases, um modelo pode ser desenvolvido no domínio modal ou no domínio das fases (Marti e Tavighi, 2018). Diz-se que uma linha de transmissão está

representada no domínio modal quando esta linha é separada em seus modos de propagação, que se comportam como linhas monofásicas. Neste caso, calculam-se as correntes e tensões em cada um dos modos de propagação da linha (correntes e tensões modais) e em seguida, utilizando uma matriz de transformação adequada (matriz de transformação modal), obtêm-se as correntes e tensões de fase da linha (correntes e tensões no domínio das fases). Quando uma linha é representada no domínio das fases, as correntes e tensões de fase são calculadas diretamente nas fases, sem que a linha seja desacoplada em seus modos de propagação.

Uma maneira de se representar uma linha diretamente no domínio de fase consiste em usar uma matriz ABCD para descrevê-la. Em (Souza et al, 2013; Carvalho et al, 2016) são apresentados métodos de obtenção de matrizes ABCD para linhas bifásicas e trifásicas. Embora eficientes, os métodos propostos por Souza e Carvalho (Souza et al, 2013; Carvalho et al, 2016) são complexos e tornam-se inviáveis para linha com mais de três condutores (por exemplo, para linhas de circuito duplo).

Neste trabalho está sendo proposta uma maneira simples e eficiente de obter a matriz ABCD de uma linha de transmissão genérica. A matriz ABCD é calculada a partir das respostas de circuito aberto e de curto circuito da linha, que podem ser obtidas com o uso de qualquer modelo clássico de linha de transmissão.

O procedimento desenvolvido foi utilizado para obter a matriz ABCD para uma linha trifásica de 440

kV. Uma vez obtida, a matriz ABCD foi utilizada para representar a linha em simulações do procedimento de energização desta linha. Estas simulações foram realizadas no domínio da frequência e em seguida convertidas para o domínio do tempo por meio da transformada numérica inversa de Laplace (Moreno, 2008). Os resultados obtidos foram comparados com um modelo clássico que é utilizado para representar linhas de transmissão (Gustavsen, 2005).

2 Procedimento proposto para obter a matriz ABCD de uma linha de transmissão genérica

2.1 Descrição geral do procedimento.

Considere uma linha de transmissão genérica com n fases, conforme mostra a Figura 1.

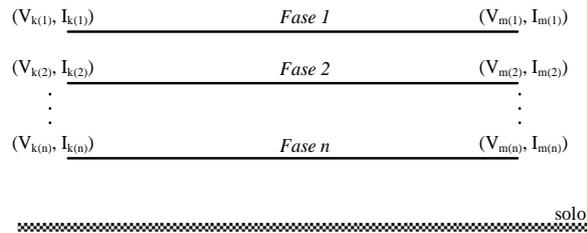


Figura 1. Linha de transmissão genérica de n fases.

Na Figura 1, os pares $(V_{k(i)}, I_{k(i)})$ são tensão e a corrente no emissor da i -ésima fase da linha, enquanto que o par $(V_{m(i)}, I_{m(i)})$ corresponde à tensão e a corrente no terminal receptor desta fase.

A matriz ABCD para a linha de transmissão mostrada na Figura 1 é escrita na forma (Bhati, 1990):

$$\begin{bmatrix} [V_k] \\ [I_k] \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [A] & [B] \\ [C] & [D] \end{bmatrix} \begin{bmatrix} [V_m] \\ [I_m] \end{bmatrix} \quad (1)$$

Na equação (1) $[A]$, $[B]$, $[C]$ e $[D]$ são matrizes com dimensão $n \times n$ enquanto que $[V_k]$, $[I_k]$, $[V_m]$ e $[I_m]$ são matrizes de dimensão $n \times 1$, sendo n a quantidade de fases da linha. Estas matrizes são escritas como sendo:

$$[A] = \begin{bmatrix} A_{11} & \cdots & A_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ A_{n1} & \cdots & A_{nn} \end{bmatrix}; [B] = \begin{bmatrix} B_{11} & \cdots & B_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ B_{n1} & \cdots & B_{nn} \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$[C] = \begin{bmatrix} C_{11} & \cdots & C_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ C_{n1} & \cdots & C_{nn} \end{bmatrix}; [D] = \begin{bmatrix} D_{11} & \cdots & D_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ D_{n1} & \cdots & D_{nn} \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$[V_k] = \begin{bmatrix} V_{k(1)} \\ V_{k(2)} \\ \vdots \\ V_{k(n)} \end{bmatrix}; [V_m] = \begin{bmatrix} V_{m(1)} \\ V_{m(2)} \\ \vdots \\ V_{m(n)} \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$[I_k] = \begin{bmatrix} I_{k(1)} \\ I_{k(2)} \\ \vdots \\ I_{k(n)} \end{bmatrix}; [I_m] = \begin{bmatrix} I_{m(1)} \\ I_{m(2)} \\ \vdots \\ I_{m(n)} \end{bmatrix} \quad (5)$$

Substituindo as equações (2)-(5) na equação (1) obtém-se um sistema com $2n$ equações e $4n^2$ incógnitas (sendo que as incógnitas são os elementos da matriz ABCD). Para que este sistema tenha solução, é necessário conhecer as correntes e tensões nos terminais da linha, considerando $2n$ configurações desta linha. O conceito de “configuração da linha” será melhor explicado na subseção 2.2.

2.2 Descrição do procedimento para uma linha de transmissão trifásica.

A Figura 2 mostra uma linha de transmissão trifásica genérica, com as correntes e tensões nos terminais emissor e receptor.

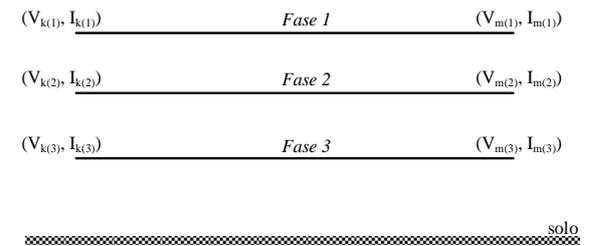


Figura 2. Linha de transmissão trifásica genérica.

Com base na equação (1), a matriz ABCD para a linha mostrada na Figura 2 é escrita como sendo:

$$\begin{bmatrix} V_{k(1)} \\ V_{k(2)} \\ V_{k(3)} \\ I_{k(1)} \\ I_{k(2)} \\ I_{k(3)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & A_{13} & B_{11} & B_{12} & B_{13} \\ A_{21} & A_{22} & A_{23} & B_{21} & B_{22} & B_{23} \\ A_{31} & A_{32} & A_{33} & B_{31} & B_{32} & B_{33} \\ C_{11} & C_{12} & C_{13} & D_{11} & D_{12} & D_{13} \\ C_{21} & C_{22} & C_{23} & D_{21} & D_{22} & D_{23} \\ C_{31} & C_{32} & C_{33} & D_{31} & D_{32} & D_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{m(1)} \\ V_{m(2)} \\ V_{m(3)} \\ I_{m(1)} \\ I_{m(2)} \\ I_{m(3)} \end{bmatrix} \quad (6)$$

Para obter a matriz ABCD da linha mostrada na Figura 2 é necessário calcular as correntes e tensões nos terminais desta linha considerando seis configurações distintas da mesma. Foram escolhidas configurações em que no terminal receptor as três fases da linha estejam abertas ou em curto-circuito, enquanto que no terminal emissor duas fases estão aterradas e na terceira é aplicada uma fonte de tensão. As correntes e tensões, em cada uma das configurações podem ser calculadas, no domínio da

frequência, a partir de qualquer modelo que leve em conta que os parâmetros são variáveis em relação à frequência e distribuídos ao longo do comprimento da linha. A Figura 3 mostra as configurações escolhidas.

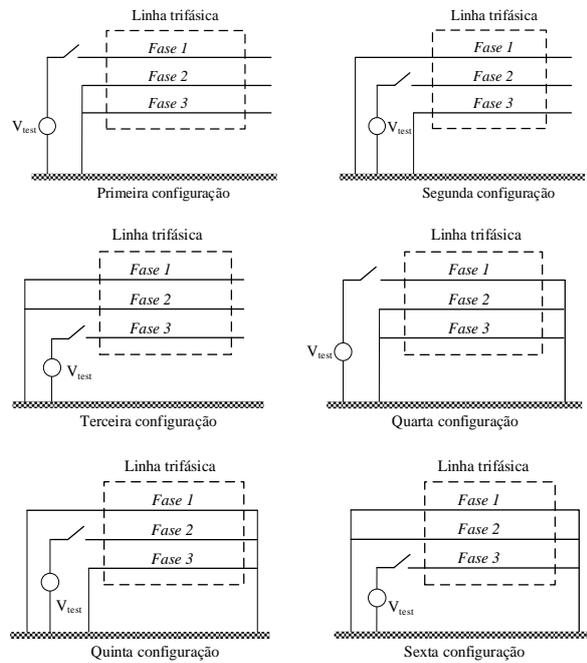


Figura 3. Seis possíveis configurações para uma linha trifásica.

Considerando que na Figura 3 todas as correntes e tensões já foram calculadas é possível escrever estas correntes e tensões, para cada configuração, na forma de matriz ABCD. Deste modo, obtém-se:

Para a primeira configuração:

$$\begin{bmatrix} V_{\text{test}} \\ 0 \\ 0 \\ I_{k(1)} \\ I_{k(2)} \\ I_{k(3)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & A_{13} & B_{11} & B_{12} & B_{13} \\ A_{21} & A_{22} & A_{23} & B_{21} & B_{22} & B_{23} \\ A_{31} & A_{32} & A_{33} & B_{31} & B_{32} & B_{33} \\ C_{11} & C_{12} & C_{13} & D_{11} & D_{12} & D_{13} \\ C_{21} & C_{22} & C_{23} & D_{21} & D_{22} & D_{23} \\ C_{31} & C_{32} & C_{33} & D_{31} & D_{32} & D_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{m(1)} \\ V_{m(2)} \\ V_{m(3)} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (7)$$

Para a segunda configuração:

$$\begin{bmatrix} 0 \\ V_{\text{test}} \\ 0 \\ I_{k(1)} \\ I_{k(2)} \\ I_{k(3)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & A_{13} & B_{11} & B_{12} & B_{13} \\ A_{21} & A_{22} & A_{23} & B_{21} & B_{22} & B_{23} \\ A_{31} & A_{32} & A_{33} & B_{31} & B_{32} & B_{33} \\ C_{11} & C_{12} & C_{13} & D_{11} & D_{12} & D_{13} \\ C_{21} & C_{22} & C_{23} & D_{21} & D_{22} & D_{23} \\ C_{31} & C_{32} & C_{33} & D_{31} & D_{32} & D_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{m(1)} \\ V_{m(2)} \\ V_{m(3)} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (8)$$

Para a terceira configuração:

$$\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ V_{\text{test}} \\ I_{k(1)} \\ I_{k(2)} \\ I_{k(3)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & A_{13} & B_{11} & B_{12} & B_{13} \\ A_{21} & A_{22} & A_{23} & B_{21} & B_{22} & B_{23} \\ A_{31} & A_{32} & A_{33} & B_{31} & B_{32} & B_{33} \\ C_{11} & C_{12} & C_{13} & D_{11} & D_{12} & D_{13} \\ C_{21} & C_{22} & C_{23} & D_{21} & D_{22} & D_{23} \\ C_{31} & C_{32} & C_{33} & D_{31} & D_{32} & D_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{m(1)} \\ V_{m(2)} \\ V_{m(3)} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (9)$$

Para a quarta configuração:

$$\begin{bmatrix} V_{\text{test}} \\ 0 \\ 0 \\ I_{k(1)} \\ I_{k(2)} \\ I_{k(3)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & A_{13} & B_{11} & B_{12} & B_{13} \\ A_{21} & A_{22} & A_{23} & B_{21} & B_{22} & B_{23} \\ A_{31} & A_{32} & A_{33} & B_{31} & B_{32} & B_{33} \\ C_{11} & C_{12} & C_{13} & D_{11} & D_{12} & D_{13} \\ C_{21} & C_{22} & C_{23} & D_{21} & D_{22} & D_{23} \\ C_{31} & C_{32} & C_{33} & D_{31} & D_{32} & D_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ I_{m(1)} \\ I_{m(2)} \\ I_{m(3)} \end{bmatrix} \quad (10)$$

Para a quinta configuração:

$$\begin{bmatrix} 0 \\ V_{\text{test}} \\ 0 \\ I_{k(1)} \\ I_{k(2)} \\ I_{k(3)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & A_{13} & B_{11} & B_{12} & B_{13} \\ A_{21} & A_{22} & A_{23} & B_{21} & B_{22} & B_{23} \\ A_{31} & A_{32} & A_{33} & B_{31} & B_{32} & B_{33} \\ C_{11} & C_{12} & C_{13} & D_{11} & D_{12} & D_{13} \\ C_{21} & C_{22} & C_{23} & D_{21} & D_{22} & D_{23} \\ C_{31} & C_{32} & C_{33} & D_{31} & D_{32} & D_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ I_{m(1)} \\ I_{m(2)} \\ I_{m(3)} \end{bmatrix} \quad (11)$$

Para a sexta configuração:

$$\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ V_{\text{test}} \\ I_{k(1)} \\ I_{k(2)} \\ I_{k(3)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & A_{13} & B_{11} & B_{12} & B_{13} \\ A_{21} & A_{22} & A_{23} & B_{21} & B_{22} & B_{23} \\ A_{31} & A_{32} & A_{33} & B_{31} & B_{32} & B_{33} \\ C_{11} & C_{12} & C_{13} & D_{11} & D_{12} & D_{13} \\ C_{21} & C_{22} & C_{23} & D_{21} & D_{22} & D_{23} \\ C_{31} & C_{32} & C_{33} & D_{31} & D_{32} & D_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ I_{m(1)} \\ I_{m(2)} \\ I_{m(3)} \end{bmatrix} \quad (12)$$

A partir das equações (7)-(12) é possível montar um sistema com 36 equações e 36 incógnitas e, a partir da solução deste sistema, obtemos os elementos da matriz ABCD que representa a linha trifásica.

3 Validação do procedimento proposto

Para validar o procedimento proposto, o mesmo foi utilizado para obter a matriz ABCD de uma linha trifásica de 440 kV típica. Em seguida, a representação da linha na forma de matriz ABCD foi utilizada para simular a energização desta linha.

A Figura 4 mostra a linha de 440 kV utilizada para validar o método proposto. As fases 1, 2 e 3 desta linha são constituídas de quatro subcondutores do tipo Grosbeack e os cabos para-raios (condutores 4 e 5) cabos EHSW-3/8". Considerou-se que a linha possui comprimento de 150 km e que ela está sobre um solo cuja resistividade é 1000 Ωm.

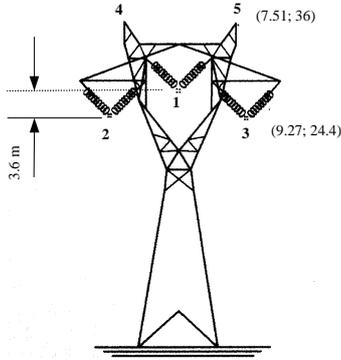


Figura 4. Linha de transmissão trifásica típica 440 kV.

Os parâmetros da linha foram calculados para frequências compreendidas entre 0,1 Hz e 100 kHz, levando em conta os efeitos solo e pelicular (Hofmann, 2003).

3.1 Cálculo dos elementos da matriz ABCD

Inicialmente foram calculadas as correntes e tensões para todas as configurações mostradas na Figura 3. As correntes e as tensões foram calculadas, no domínio da frequência, usando um modelo de linha de transmissão de domínio modal clássico (Gustavsen, 2005). Considerou-se que a fonte de tensão conectada no emissor, na Figura 3, possui tensão constante igual a 1 p.u.

Em seguida as correntes e as tensões foram substituídas nas equações (7)-(12) que constituem em um sistema de 36 equações com 36 incógnitas, cuja solução resulta nos parâmetros da matriz ABCD.

Todos os elementos da matriz ABCD foram calculados, mas somente um deles será mostrado.

A Figura 5 mostra o módulo do elemento A_{11} .

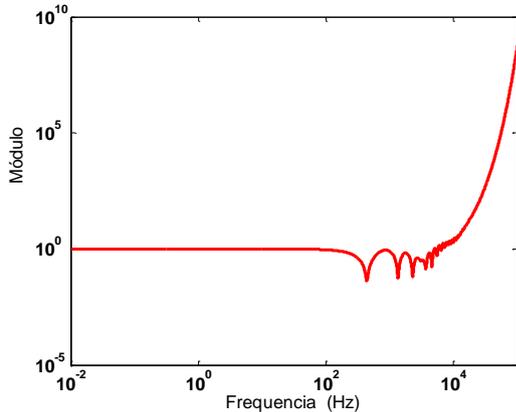


Figura 5. Módulo do elemento A_{11} .

A Figura 5 mostra que o elemento A_{11} é uma função suave e este é o comportamento apresentado pelos demais elementos da matriz ABCD.

3.2 Representando da linha com a matriz ABCD

Para verificar se a matriz ABCD foi calculada de maneira correta, a linha foi representada por esta matriz nas simulações de transitórios eletromagnéticos resultantes de energização.

Foram realizados os testes típicos de energização da linha em aberto e em curto circuito e, como complementação, foram realizadas simulações de transitórios eletromagnéticos resultantes da energização da linha conectada a uma carga trifásica. Os resultados obtidos com a linha representada pela matriz ABCD foram comparados com os resultados obtidos com a linha representada pelo modelo clássico (Gustavsen, 2005). As simulações foram realizadas no domínio da frequência e em seguida convertidas para o domínio do tempo por meio da transformada numérica inversa de Laplace.

3.2.1 Energização da linha em aberto

A Figura 6 mostra a linha de transmissão com o receptor aberto, com uma fonte de tensão constante de 1 p.u. conectada ao emissor da fase 1.

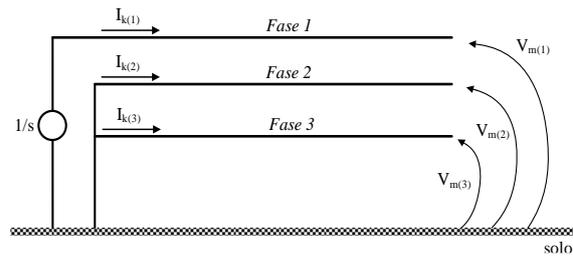


Figura 6. Linha em aberto.

Uma vez que a matriz ABCD já foi previamente calculada na subseção 3.1, é possível representar esta linha por meio de sua matriz ABCD conforme mostra a equação (13).

$$\begin{bmatrix} 1/s \\ 0 \\ 0 \\ I_{k(1)} \\ I_{k(2)} \\ I_{k(3)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & A_{13} & B_{11} & B_{12} & B_{13} \\ A_{21} & A_{22} & A_{23} & B_{21} & B_{22} & B_{23} \\ A_{31} & A_{32} & A_{33} & B_{31} & B_{32} & B_{33} \\ C_{11} & C_{12} & C_{13} & D_{11} & D_{12} & D_{13} \\ C_{21} & C_{22} & C_{23} & D_{21} & D_{22} & D_{23} \\ C_{31} & C_{32} & C_{33} & D_{31} & D_{32} & D_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{m(1)} \\ V_{m(2)} \\ V_{m(3)} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (13)$$

A partir da equação (13) é possível calcular as correntes no emissor ($I_{k(1)}$, $I_{k(2)}$ e $I_{k(3)}$) e as tensões no receptor ($V_{m(1)}$, $V_{m(2)}$ e $V_{m(3)}$).

A Figura 7 mostra a tensão no receptor da fase 1 obtida com a matriz ABCD e com o modelo clássico.

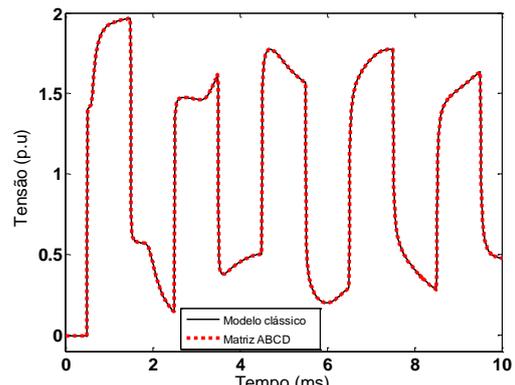


Figura 7. Tensão no receptor da fase 1.

A Figura 7 mostra que o resultado obtido com a matriz ABCD está de acordo com o resultado obtido com o modelo clássico.

Observa-se na Figura 7 que a tensão no terminal da fase 1 alcança um valor próximo a 2 p.u., conforme previsto na teoria de linhas de transmissão (Gustavsen and Semlyen, 1998).

3.2.2 Energização da linha em curto

A Figura 8 mostra a configuração utilizada para simular a energização da linha em curto-circuito. Nesta configuração, o emissor da linha está aterrado e há uma fonte de tensão constante de 1 p.u. conectada no emissor da fase 1.

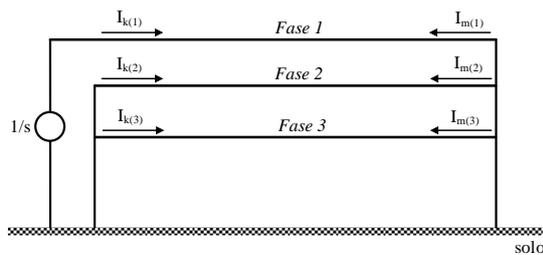


Figura 8. Linha em curto-circuito.

A linha em curto pode ser representada, na forma de uma matriz ABCD, como sendo:

$$\begin{bmatrix} 1/s \\ 0 \\ 0 \\ I_{k(1)} \\ I_{k(2)} \\ I_{k(3)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & A_{13} & B_{11} & B_{12} & B_{13} \\ A_{21} & A_{22} & A_{23} & B_{21} & B_{22} & B_{23} \\ A_{31} & A_{32} & A_{33} & B_{31} & B_{32} & B_{33} \\ C_{11} & C_{12} & C_{13} & D_{11} & D_{12} & D_{13} \\ C_{21} & C_{22} & C_{23} & D_{21} & D_{22} & D_{23} \\ C_{31} & C_{32} & C_{33} & D_{31} & D_{32} & D_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ I_{m(1)} \\ I_{m(2)} \\ I_{m(3)} \end{bmatrix} \quad (14)$$

A partir da equação (14) é possível calcular as correntes no emissor ($I_{k(1)}$, $I_{k(2)}$ e $I_{k(3)}$) e no receptor da linha ($I_{m(1)}$, $I_{m(2)}$ e $I_{m(3)}$).

A Figura 9 mostra a corrente no emissor da fase 3 obtida com a matriz ABCD e com o modelo clássico.

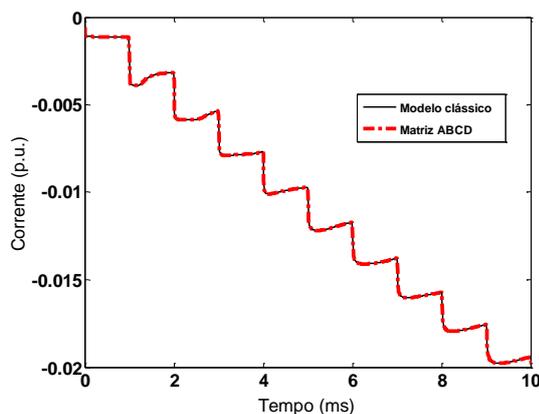


Figura 9. Corrente no emissor da fase 3.

A Figura 9 mostra que os resultados obtidos com a matriz ABCD são idênticos aos resultados obtidos com o modelo clássico.

Os resultados obtidos das simulações, da linha em aberto em curto, obtidos com a matriz ABCD e com o modelo clássico foram idênticos e este fato nos permite concluir a que a matriz ABCD foi obtida corretamente.

3.2.3 Energização da linha conectada a uma carga

A Figura 10 mostra a linha conectada a uma carga trifásica equilibrada. A linha foi energizada por um gerador trifásico.

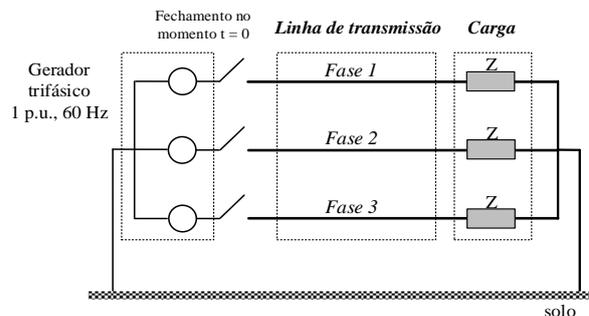


Figura 10. Linha trifásica conectada a uma carga balanceada.

A Figura 11 mostra a tensão, na extremidade receptora da fase 1 da linha, obtida com a matriz ABCD e com o modelo clássico.

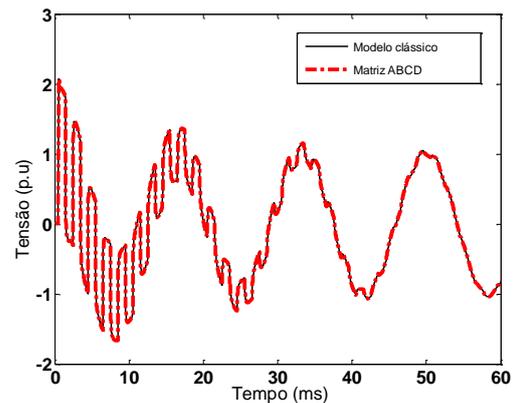


Figura 11. Tensão na extremidade receptora da fase 1 da linha.

É possível verificar na Figura 11 que os resultados obtidos com matriz ABCD e com modelo clássico estão de acordo.

Como ilustração complementar, a Figura 12 mostra as tensões nas três fases do receptor da linha. Estas tensões foram obtidas com a matriz ABCD e com o modelo clássico e os resultados obtidos com os dois modelos são coincidentes.

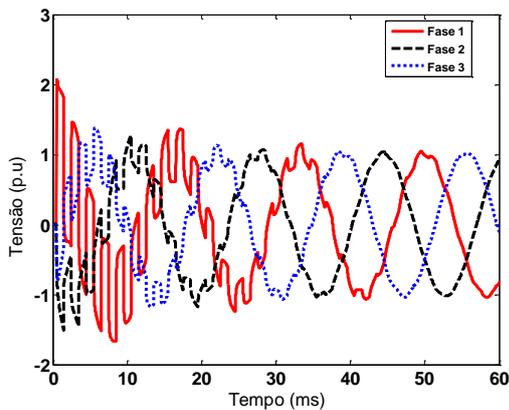


Figura 12. Tensão de fase na extremidade receptora da linha.

Verifica-se então que os resultados de simulações de transitórios eletromagnéticos resultantes da energização da linha obtidos com a matriz ABCD e com o modelo clássico são idênticos. Portanto conclui-se que a matriz ABCD foi obtida corretamente, validando assim o método de obtenção que foi proposto.

4 Conclusões

Este artigo descreve um procedimento alternativo para obter a matriz ABCD de linhas de transmissão. O procedimento é baseado nas respostas de circuito aberto e curto circuito da linha, e essas respostas podem ser obtidos por qualquer modelo de linha de transmissão clássico que é utilizado para simular transitórios eletromagnéticos.

O procedimento proposto, ao contrário de outros métodos existentes, é simples e elegante e pode ser aplicado para linhas com uma quantidade genérica de fases.

O método foi aplicado para obter a matriz ABCD de uma linha trifásica típica. Esta matriz ABCD, que é um modelo para a linha no domínio das fases, foi utilizada para simular transitórios eletromagnéticos resultantes da energização da linha.

Os resultados obtidos com a matriz ABCD foram comparados com os resultados obtidos com um modelo clássico para a linha e verificou-se que os dois modelos apresentaram os mesmos resultados.

Portanto é possível concluir que o procedimento proposto para obter a matriz ABCD de linhas de transmissão é eficiente e foi desenvolvido corretamente.

Agradecimentos

Esta pesquisa tem apoio financeiro do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq).

Referências Bibliográficas

- Bhati, A. A. (1990). A computer based method for computing the N-dimensional generalized ABCD parameters of N-dimensional systems with distributed parameters. *The Twenty-Second Southeastern Symposium on System Theory*, pp. 590-593.
- Carvalho, C. G.; Costa, E. C. M.; Kurokawa, S. e Pissolato, J. (2016). Alternative phase-domain model for multiconductor transmission lines using two modal transformation matrices. *Electric Power Components and Systems*, Vol. 44, (3), pp. 291-301.
- Gustavsen, B. e Semlyen, A. (1998). Combined phase and modal domain calculation of transmission line transients based on vector fitting. *IEEE Transaction on Power Delivery*, Vol. 13, (2), pp. 596-604.
- Gustavsen, B. (2005). Validation of frequency-dependent transmission line models. *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 20, (2), pp. 925-933.
- Hofmann, L. (2003). Series expansions for line series impedances considering different specific resistances, magnetic permeabilities, and dielectric permittivities of conductors, air, and ground. *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 18, (2), pp. 564-570.
- Marti, J. R. (1982). Accurate modelling of frequency-dependent transmission lines in electromagnetic transient simulation. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, Vol. PAS-101, (1), pp. 147-155.
- Marti, J. R. e Tavighi, B. (2018). Frequency-dependent multiconductor transmission line model with collocated voltage and current propagation. *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 33, No. 1, pp. 71-81.
- Moreno, P.; Ramirez, A. (2008). Implementation of the Numerical Laplace Transform: A Review., *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 23, No. 4, pp. 2599-2609.
- Semlyen, A. e Gustavsen, B. (2012). Phase-domain transmission-line modeling with enforcement of symmetry via the propagated characteristic admittance matrix. *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 27, (2), pp. 626-631.
- Souza, N. V.; Carvalho, C. G.; Kurokawa, S. e Pissolato, J. (2013). A distributed-parameters transmission line model developed directly in the phase domain. *Electric Power Components and Systems*, Vol. 41, (11), pp. 1100-1113.