



**SNPTTE
SEMINÁRIO NACIONAL
DE PRODUÇÃO E
TRANSMISSÃO DE
ENERGIA ELÉTRICA**

GSC 07
14 a 17 Outubro de 2007
Rio de Janeiro - RJ

GRUPO X

GRUPO DE ESTUDO DE SOBRETENSÕES E COORDENAÇÃO DE ISOLAMENTO – GSC

ANÁLISE DO EFEITO DA TRANSPOSIÇÃO EM LINHAS DE TRANSMISSÃO NOS ESTUDOS DE FENÔMENOS TRANSITÓRIOS ELETROMAGNÉTICOS

Alexander V. Elguera Flores *

Maria Cristina Dias Tavares

Carlos M. J. Portela

UNICAMP

UFRJ

RESUMO

No presente trabalho analisa-se o erro resultante de tratar uma linha de transmissão como idealmente transposta para a faixa de frequência significativa para grande parte dos fenômenos transitórios de manobra, especificamente até 10 kHz. Apresenta-se uma análise teórica no domínio da frequência, identificando o desequilíbrio entre as fases, considerando uma linha idealmente transposta e considerando uma linha com seções de transposição real. A variação com a frequência dos parâmetros elétricos da linha de transmissão foi corretamente representada, permitindo observar a diferença entre as duas representações da linha. A imprecisão na modelagem de linhas de transmissão pode originar resultados incorretos ao calcular os transitórios eletromagnéticos resultantes de manobras usuais ou de defeitos.

PALAVRAS-CHAVE

Transposição de Linha, Dependência da Frequência, Parâmetros Elétricos, Transitórios Eletromagnéticos.

1.0 - INTRODUÇÃO

Os sistemas de transmissão não deveriam introduzir nenhum desbalanço para condições balanceadas de carga e geração. No entanto, a geometria das torres de transmissão cria desequilíbrio porque as distâncias entre fases e ou as distâncias entre as fases e a terra e entre fases e cabos pára-raios, não são iguais, o que, mesmo para condições balanceadas de carga e geração, origina desbalanço de tensões e ou correntes, para a frequência industrial e outras frequências.

A disposição espacial dos condutores conduz a matrizes de impedâncias longitudinais por unidade de comprimento e a matrizes de admitâncias transversais por unidade de comprimento, em coordenadas de fase, em que, quer os elementos diagonais, quer os não diagonais, não são iguais entre si, para as duas matrizes, para qualquer frequência. Consequentemente, para qualquer frequência, as correntes de fase, ou as tensões fase-terra, ou as correntes e tensões, não podem ser exatamente balanceadas, incluindo a frequência industrial. Considerando, na linha, módulos de transposição, de comprimento L , tal que, na gama de frequência considerada, L seja muito inferior ao quarto de comprimento de onda, e haja, em cada módulo, uma permutação de fases, por forma que a disposição relativa das três fases em trechos de comprimento $L/3$, corresponda a permutação circular, para o conjunto do módulo, pode-se, com erro moderado, admitir que as matrizes de impedâncias longitudinais e de admitâncias transversais, por unidade de comprimento, têm:

- Elementos diagonais iguais entre si e iguais à média dos três elementos diagonais da matriz na ausência de transposição.
- Elementos não diagonais iguais entre si e iguais à média dos seis elementos não diagonais da matriz na ausência de transposição.

Em estudos de transitórios eletromagnéticos é usual representar as linhas de transmissão como linhas idealmente transportas (LIT). A linha com seção de transposição real (LT) pode ser considerada como uma LIT em regime permanente, mas não para toda a faixa de frequências [1] [2]. A correta representação da linha de transmissão é de grande importância para estudos de transitórios eletromagnéticos.

Neste artigo mostra-se que a representação das linhas como LIT em toda a gama de frequência significativa para fenômenos transitórios de manobra não é totalmente correta. Apresenta-se o resultado da análise da resposta da linha no domínio da frequência. A linha foi representada através da sua função de transferência para a faixa de frequência de 0 a 10 kHz, dominante em grande parte dos fenômenos transitórios de manobra. Compara-se o comportamento da linha nas hipóteses de transposição real e de transposição "ideal". Apresenta-se, também, o resultado, em função do tempo, da simulação de uma manobra, para ambas as representações de linha.

Foi possível observar o erro de representar uma linha com transposição real através de uma linha idealmente transposta para todas as frequências importantes durante a ocorrência de fenômenos transitórios eletromagnéticos.

2.0 - FORMULAÇÃO BÁSICA

2.1 Parâmetros Elétricos de Linhas de Transmissão

Os parâmetros elétricos de uma linha de transmissão são expressos na forma de matrizes, cujas dimensões correspondem ao número de condutores da linha (sub-condutores que compõem a fase e os cabos pára-raios). As matrizes de parâmetros longitudinais e transversais são reduzidas para matrizes equivalentes, cujas dimensões correspondem ao número de fases da linha. Na formulação considerada abaixo considera-se as aproximações usuais que introduzem erros adequadamente reduzidos para a análise em causa.

2.1.1 Matriz de Parâmetros Longitudinais

$$Z_{pq} = (Rc_{pq} + Re_{pq}) + j \cdot (Xc_{pq} + Xe_{pq} + Xext_{pq}), \quad p, q = 1, 2, 3, \dots, n \quad (1)$$

onde:

n : número de condutores.

$Rc + jXc$: impedância interna do condutor por unidade de comprimento.

$jXext$: reatância mútua entre condutores por unidade de comprimento (supondo solo ideal).

$Re + jXe$: correção da impedância externa por unidade de comprimento (devido ao solo não ser condutor ideal).

2.1.2 Matriz de Parâmetros Transversais por Unidade de Comprimento

$$Y_{pq} = j2\pi\omega\epsilon_a [A]^{-1} \quad (2)$$

onde:

ω : frequência angular (rad/s).

ϵ_a : permissividade do ar (8,85 pF/m).

A : matriz de elementos diagonais $A_{pp} = \ln(2h_p / r_p)$ e de elementos não diagonais $A_{pq} = \ln(2D_{pq} / d_{pq})$.

h_p : distância entre o eixo do condutor p e o solo (para solo plano e horizontal).

r_p : raio externo do condutor p .

D_{pq} : distância entre o condutor p e a imagem do condutor q , em relação ao solo (para solo plano e horizontal).

d_{pq} : distância entre o condutor p e o condutor q .

Na figura 1 está apresentada a torre da linha de transmissão analisada.

Os parâmetros longitudinais foram calculados no domínio da frequência para a linha de transmissão analisada, supondo a resistividade da terra de 1000 $\Omega.m$. Nas figuras 2 e 3 a resistência própria e indutância própria por unidade de comprimento são apresentadas no domínio da frequência.

Os parâmetros elétricos apresentados são calculados para uma linha não transposta. A não transposição da linha pode ser observada nas figuras. 2 e 3 já que os valores próprios para as fases "a" e "b" não são iguais, e os valores para as fases "a" e "c" são iguais, o que é coerente com a torre de linha mostrada na figura 1.

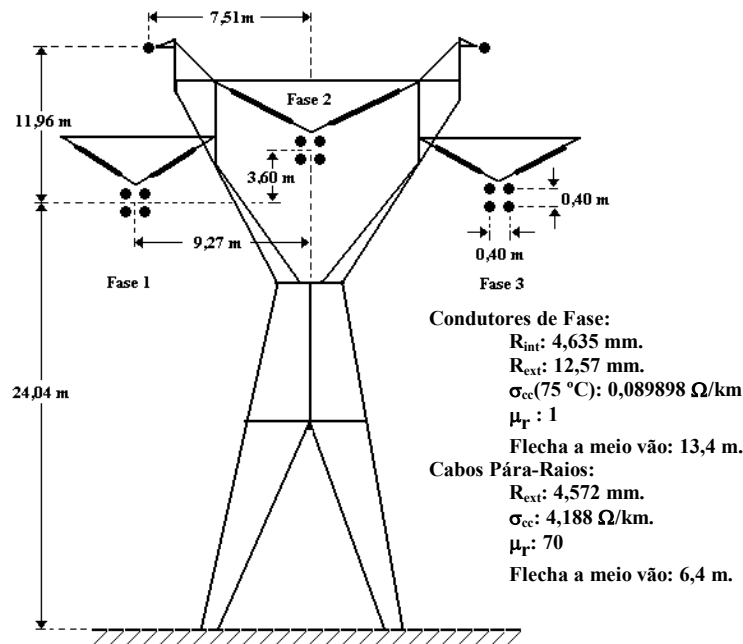


FIGURA 1. Representação esquemática da torre de linha estudada.

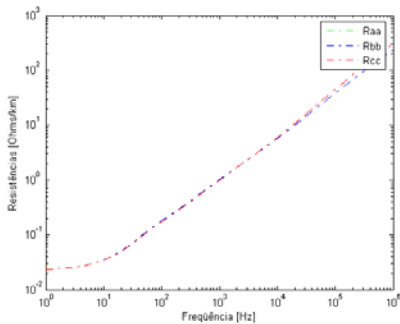


FIGURA 2. Resistência própria por unidade de comprimento.

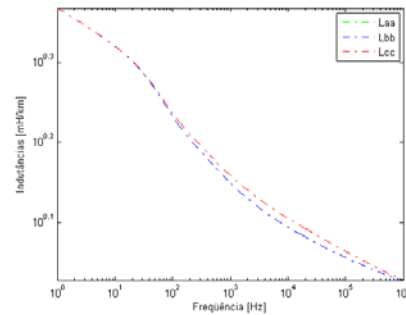


FIGURA 3. Indutância própria por unidade de comprimento.

2.2 Linha de Transmissão Polifásica

As equações que caracterizam o comportamento de uma linha de transmissão polifásica no domínio da frequência, incluindo a propagação, podem ser apresentadas como:

$$\frac{d[V_p]}{dx} = -[Z][I_p]; \quad \frac{d[I_p]}{dx} = -[Y][V_p] \quad (3)$$

$$\frac{d^2[V_p]}{dx^2} = [Z][Y][V_p]; \quad \frac{d^2[I_p]}{dx^2} = [Y][Z][I_p] \quad (4)$$

onde:

x : distância longitudinal.

$[Z]$: matriz impedância longitudinal por unidade de comprimento em coordenadas de fase,

$[Y]$: matriz admitância transversal por unidade de comprimento em coordenadas de fase,

$[V_p]$ e $[I_p]$: vetores coluna de tensão transversal de fase (medida transversalmente entre terra e fase) e corrente de fase longitudinal, respectivamente.

2.3 Linha Idealmente Transposta (LIT)

Uma linha de transmissão é chamada linha idealmente transposta (LIT) se a transposição é suposta ideal para toda a faixa de frequências do estudo. A transposição da linha resulta em parâmetros longitudinais e transversais da linha equilibrados se a linha for dividida em pequenas seções de transposição quando comparado com $\frac{1}{4}$ do

comprimento de onda (λ) das frequências envolvidas. Para a frequência fundamental isto é realizado com seções próximas de 100 km, e os parâmetros de linha podem ser considerados como valores médios da linha (5).

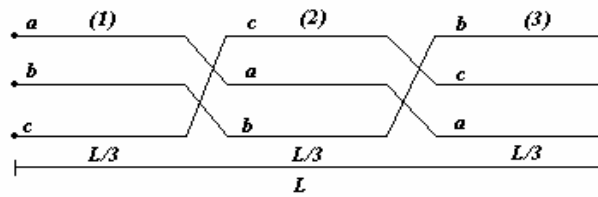


FIGURA 4. Esquema da transposição de linha com três seções (LT3).

$$[Z_{IT}] = \frac{[Z_1]}{3} + \frac{[Z_2]}{3} + \frac{[Z_3]}{3} = \begin{bmatrix} Z_s & Z_m & Z_m \\ Z_m & Z_s & Z_m \\ Z_m & Z_m & Z_s \end{bmatrix} \quad (5)$$

Esta matriz equivalente de LIT tem todos os elementos diagonais iguais e todos os elementos fora da diagonal também iguais.

A transformação de Clarke, TCL, pode ser usada como a matriz de transformação para LIT:

$$[T_{CL}] = \begin{bmatrix} 1/\sqrt{3} & -1/\sqrt{6} & 1/\sqrt{2} \\ 1/\sqrt{3} & 2/\sqrt{6} & 0 \\ 1/\sqrt{3} & -1/\sqrt{6} & -1/\sqrt{2} \end{bmatrix} \quad (6)$$

É usual considerar a linha como LIT para a faixa inteira de frequências em estudos de transitórios, o que não é válido para frequências onde $1/4$ de comprimento de onda não é muito grande quando comparado ao ciclo de transposição (300 km). Para o caso da 5ª harmônica, 300 Hz, supondo frequência fundamental igual a 60 Hz, o comprimento de onda é menor que 1000 km, e o ciclo de transposição de 300 km não pode ser considerado muito menor que $\lambda/4$.

2.4 Linha com Transposição Real (LT4)

Uma linha com transposição real normalmente tem duas ou três estruturas de transposição por ciclo de transposição. Uma linha com duas estruturas de transposição (LT3) tem o mesmo esquema de transposição apresentado na figura 4, onde cada seção é considerada como uma pequena linha não transposta. Uma linha com três estruturas de transposição ou quatro seções tem a particularidade das fases ficarem em posições iguais em ambos os extremos do ciclo de transposição (figura 5) e dos comprimentos dos trechos de transposição não ser único.

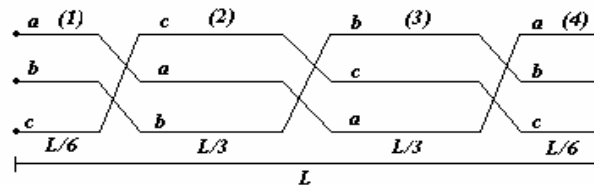


FIGURA 5 Esquema de transposição de linha com quatro seções (LT4).

Para representar uma linha com transposição real cada seção deveria ser considerada como uma linha não transposta (LNT) e a transposição deveria ser incluída como um elemento adicional.

A transformação modal de uma linha não transposta pode ser obtida através de autovetores de Γ^2 [3][4][5].

2.5 Analisando Propagação de Onda no Domínio das Fases – Método do Quadramento

A solução de propagação de onda (3) usando transformação modal é um processo elegante. A análise do comportamento das componentes de seqüência ou modos homopolar/não-homopolar é útil para estudos de sistemas de potência.

A equação de propagação de ondas, contudo, pode ser resolvida diretamente no domínio das fases, evitando qualquer transformação modal.

Considere um trecho de linha uniforme de comprimento l . Supondo uma seção finita muito pequena Δl , considerando a aproximação da derivada no ponto x aplicada ao intervalo x e $x + \Delta l$ (que resulta num erro da ordem de Δl), tem-se, entre dois “pontos” identificados pelos índices 1 e 2 a distância $\Delta l = l / 2^n$:

$$U_2 = U_1 - Z \cdot \Delta\ell \cdot I_1 \quad (7)$$

$$I_2 = -Y \cdot \Delta\ell \cdot U_1 + I_1 \quad (8)$$

Ou

$$\begin{bmatrix} U_2 \\ I_2 \end{bmatrix} = W_a \cdot \begin{bmatrix} U_1 \\ I_1 \end{bmatrix}, \quad W_{\Delta\ell} e W_a = \begin{bmatrix} \mathbf{I} & -Z \cdot \Delta\ell \\ -Y \cdot \Delta\ell & \mathbf{I} \end{bmatrix} \quad (9)$$

Sendo $W_{\Delta\ell}$ a função de transferência de tensões e correntes de fase entre os dois terminais da seção de comprimento $\Delta\ell$ e \mathbf{I} a matriz identidade.

Supondo uma seção finita de comprimento muito pequeno $\Delta\ell$, considerando a aproximação da derivada variando linearmente com x , aplicada no intervalo x e $x + \Delta\ell$ (o que resulta num erro da ordem de $\Delta\ell^2$), tem-se, entre dois "pontos" identificados pelos índices 1 e 2 e a distância $\Delta\ell = \ell / 2^n$:

$$U_2 + Z \cdot \frac{\Delta\ell}{2} \cdot I_2 = U_1 - Z \cdot \frac{\Delta\ell}{2} \cdot I_1 \quad (10)$$

$$Y \cdot \frac{\Delta\ell}{2} \cdot U_2 + I_2 = -Y \cdot \frac{\Delta\ell}{2} \cdot U_1 + I_1 \quad (11)$$

Ou

$$\begin{bmatrix} U_2 \\ I_2 \end{bmatrix} = W_b \cdot \begin{bmatrix} U_1 \\ I_1 \end{bmatrix}, \quad W_{\Delta\ell} e W_b = \begin{bmatrix} \mathbf{I} & Z \cdot \frac{\Delta\ell}{2} \\ Y \cdot \frac{\Delta\ell}{2} & \mathbf{I} \end{bmatrix}^{-1} \cdot \begin{bmatrix} \mathbf{I} & -Z \cdot \frac{\Delta\ell}{2} \\ -Y \cdot \frac{\Delta\ell}{2} & \mathbf{I} \end{bmatrix} \quad (12)$$

Sendo $W_{\Delta\ell}$ a função de transferência de tensões e correntes de fase entre os dois terminais de seção de comprimento $\Delta\ell$ e \mathbf{I} a matriz identidade.

A formulação (12) permite considerar um valor de $\Delta\ell$ mais elevado que a equação (9), evitando o uso de uma seção de comprimento " $\Delta\ell$ " extremamente pequena, o que poderia originar um erro numérico significativo devido ao número limitado de dígitos das operações numéricas.

A matriz W correspondente à cascata de 2^n seções de linha idênticas, cada uma com comprimento $\Delta\ell$, e, portanto, a um trecho de linha uniforme, de comprimento ℓ , obtém-se com n quadraturas sucessivas da matriz $W_{\Delta\ell}$ correspondente a um trecho de linha de comprimento $\Delta\ell$ (figura 6) [2].

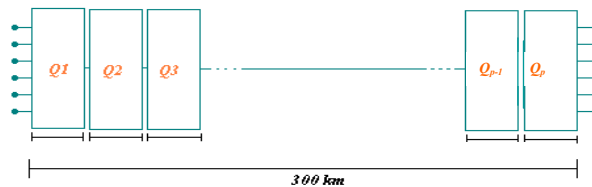


FIGURA 6. Linha de transmissão representada por cascata de seções π

Por exemplo, a matriz W de uma linha de 300 km pode ser obtida a partir da função de transferência $W_{\Delta\ell}$ de um trecho de linha de comprimento " $\Delta\ell$ " de (300/1024) km, quadrada 10 vezes. O quarto do comprimento de onda para 10 kHz é aproximadamente 7,5 km, o que é muito grande quando comparado a (300/1024) km.

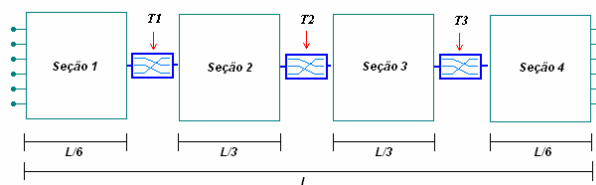


FIGURA 7. Esquema de linha de transmissão com transposição real (TL4).

3.0 - FUNÇÃO DE TRANSFERÊNCIA DA LINHA

3.1 Matriz Função de Transferência de uma Linha com Transposição Real

A matriz função de transferência de uma linha com transposição real (LT4) apresentada na figura 7 considera seções de linha não transposta e também a transposição. As matrizes de transformação das seções de linha não transposta foram obtidas usando o Método do Quadrado descrito acima.

A matriz que representa a função de transferência no domínio de fase para uma seção não transposta é:

$$\begin{bmatrix} V_{pa-2} \\ V_{pb-2} \\ V_{pc-2} \\ I_{pa-2} \\ I_{pb-2} \\ I_{pc-2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & A_{13} & B_{11} & B_{12} & B_{13} \\ A_{21} & A_{22} & A_{23} & B_{21} & B_{22} & B_{23} \\ A_{31} & A_{32} & A_{33} & B_{31} & B_{32} & B_{33} \\ C_{11} & C_{12} & C_{13} & D_{11} & D_{12} & D_{13} \\ C_{21} & C_{22} & C_{23} & D_{21} & D_{22} & D_{23} \\ C_{31} & C_{32} & C_{33} & D_{31} & D_{32} & D_{33} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} V_{pa-1} \\ V_{pb-1} \\ V_{pc-1} \\ I_{pa-1} \\ I_{pb-1} \\ I_{pc-1} \end{bmatrix} \quad (13)$$

A representação das outras seções tem a mesma forma de (13), mas essa representação muda quando elas estão associadas à matriz transposição.

A função de transferência da transposição é expressa por:

$$[T1] = [T2] = [T3] = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \quad (14)$$

O esquema da representação LT4 está apresentado na figura 7.

Na figura 7 a matriz função de transferência representa cada seção. Para obter a representação de linha completa é necessário multiplicar as matrizes função de transferência das seções da linha pela função de transferência da transposição em seqüência. Finalmente é obtida a matriz de transferência total que representa a linha completa LT4.

4.0 - RESULTADOS

Nas figuras 8 a 10 alguns resultados são apresentados para elementos A22 e B13 da matriz função de transferência da linha, considerando a transposição real (LT4) e transposição ideal (LIT).

Os outros elementos da matriz função de transferência têm comportamento similar. Para freqüências acima de 180 Hz a discrepância entre as duas representações de linha aumenta.

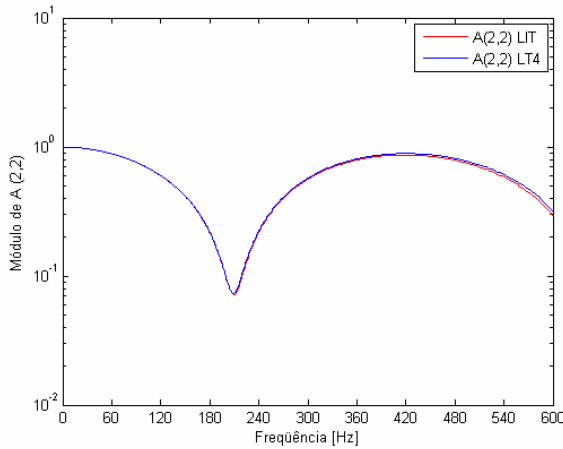


FIGURA 8 Módulo A22 para LIT e LT4.

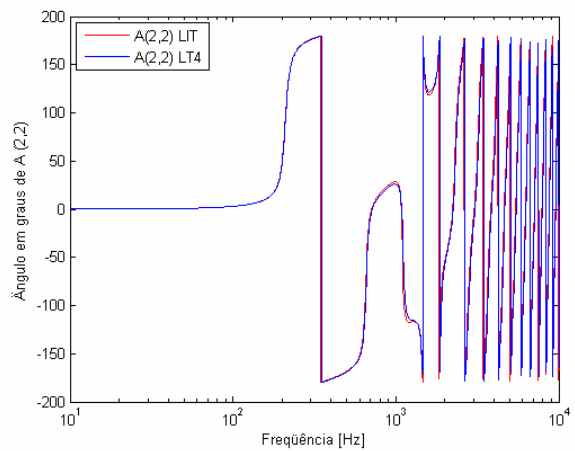


FIGURA 9 Argumento A22 para LIT e LT4.

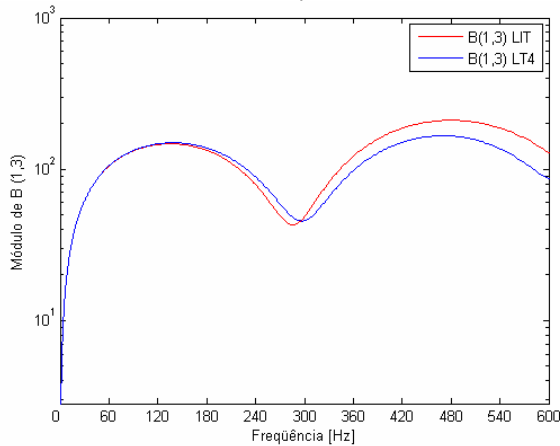


FIGURA 10. Módulos B13 para LIT e LT4.

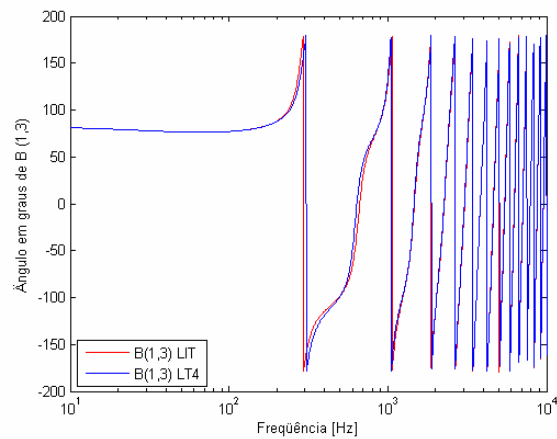


FIGURA 11. Argumentos B13 para LIT e LT4.

Nas Figuras 12 a 14 estão apresentados os módulos dos erros considerando a representação de transposição ideal e a representação de linha com transposição real.

O erro foi calculado a partir da razão entre a diferença entre as duas representações e o resultado de LT4. A discrepância entre as duas representações é significativa e deveria ser considerada para estudos de qualidade e também nos estudos de transientes eletromagnéticos. Se for simulado um fenômeno com frequência dominante na faixa onde a representação de linha é inadequada os resultados obtidos serão incorretos.

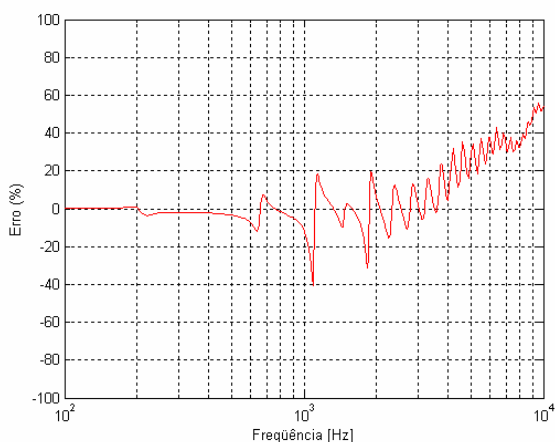


FIGURA 12. Erro entre LIT e LT4 – Módulo de A22.

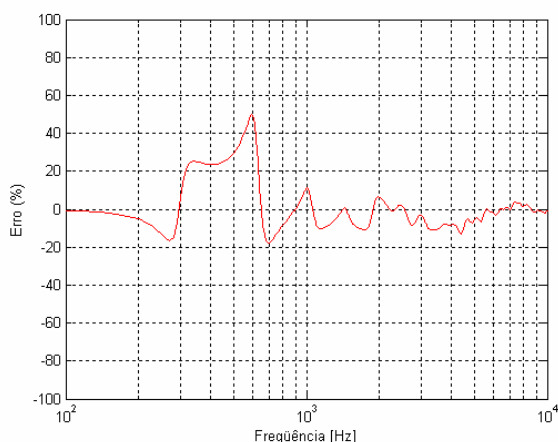


FIGURA 13. Erro entre LIT e LT4 – Módulo de B13.

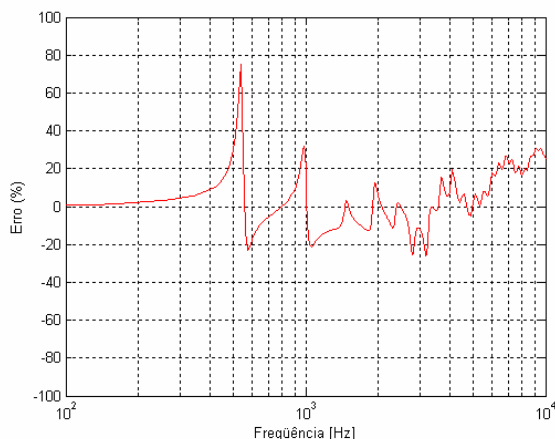


FIGURA 14. Erro entre LIT e LT4 – Módulo de C12.

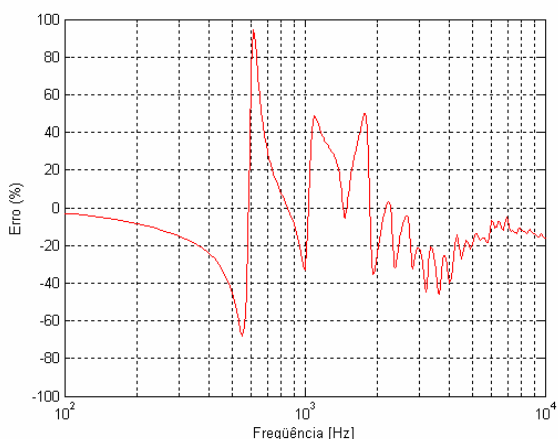


FIGURA 15. Erro entre LIT e LT4 – Módulo de C13.

5.0 - ENERGIZAÇÃO DE LINHA DE TRANSMISSÃO

Para que se possa observar a influência da representação de linha num estudo de transiente foi simulado no PSCAD/EMTDC um simples caso de energização de linha. O sistema modelado consiste de uma fonte ideal (frequência fundamental de 60 Hz) atrás de um sistema equivalente modelado por um trecho de linha de 50 km considerada idealmente transposta. Dois sistemas foram simulados sendo que a linha foi modelada como LIT e LT4 com 312,5 km de comprimento. Um resistor de pre-inserção de 300 Ω foi usado na manobra de energização. A dependência da frequência dos parâmetros longitudinais foi representada. A tensão do sistema é 440 kV. Os parâmetros do sistema equivalente representado através da linha, a 60 Hz, são:

$$\begin{aligned} R_0' &= 0,3097 \Omega/\text{km} & R_1' &= 0,0228 \Omega/\text{km} \\ X_{L0}' &= 1,4152 \Omega/\text{km} & X_{L1}' &= 0,3202 \Omega/\text{km} \\ X_{C0}' &= 3,121 \text{ nS}/\text{km} & X_{C1}' &= 5,153 \text{ nS}/\text{km} \end{aligned}$$

Alguns casos de simulação foram realizados como mostrado na Tabela I. Uma fonte de corrente harmônica de 50 A seqüência positiva (valor eficaz) foi incluída em alguns casos para destacar a diferença entre as representações de linha. Por exemplo, para o caso com a 10^a harmônica, a diferença foi elevada, cerca de 22 %. Para o caso com injeção da 17^a harmônica a diferença foi de 10 % entre as maiores sobretensões encontradas. No primeiro caso a pior sobretensão foi obtida com a representação da linha como idealmente transposta enquanto que no segundo caso a maior sobretensão ocorreu quando a transposição da linha foi corretamente representada.

TABELA I
MÁXIMOS VALORES DE TENSÃO NO TERMINAL RECEPTOR – VALORES FASE-TERRA (PICO)

Ordem Harmônica	pu referido à tensão nominal	
	LIT	LT4
-	1,25	1,28
10	1,86	1,52
17	1,64	1,80
30	1,53	1,46
38	1,45	1,40
53	1,37	1,33

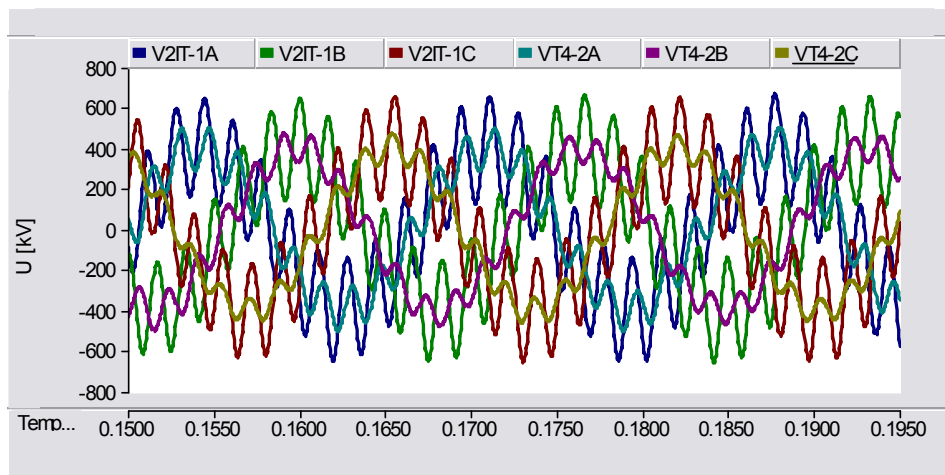


FIGURA 16. Tensão na recepção no terminal receptor para LT4 e LIT – 10ª harmônica – Corrente Harmônica de 50 A_{ef}.

As tensões na recepção para ambas as representações de linha durante a simulação de energização com injeção de corrente harmônica de 50 A_{ef} estão apresentadas na figura 16.

6.0 - CONCLUSÕES

A correta representação de uma linha de transmissão é muito importante para estudos de transitórios eletromagnéticos e de qualidade de energia. Este artigo apresenta uma análise mostrando a imprecisão de se representar uma linha com transposição real como uma linha idealmente transposta para toda a faixa de frequências num estudo de transitórios eletromagnéticos.

A discrepância entre a representação de linha real e a representação aproximada como LIT pode produzir resultados muito diferentes quando a linha é submetida a transitórios eletromagnéticos devido a manobras usuais ou durante a ocorrência de faltas. Especificamente para a linha em exemplo, a presença da 10ª ou da 17ª harmônica pode resultar em perturbações muito diferentes em termos de tensão e corrente no extremo da linha. Conforme apresentado, a severidade dos casos não está associada a um tipo de modelagem da linha, e resultados mais severos podem ser obtidos ora com a linha representada como LIT ora com a transposição corretamente representada. É importante, portanto, representar corretamente o sistema que se pretende estudar.

Quando um caso específico é estudado, a interação entre a linha e o resto do sistema deve também ser analisada, o que pode aumentar as diferenças encontradas.

A linha transposta deve ser corretamente representada, principalmente se cargas com geração harmônica elevada existirem no sistema.

7.0 - REFERENCIAS

- [1] H. W. Dommel, "EMTP Theory Book," (p 4-34), Microtran Power System Analysis Corporation, 2nd. ed., Vancouver, British Columbia, 1992.
- [2] C. Portela, M. C. Tavares, "Modelling simulation and optimization of transmission line. Applicability and limitations of some used procedures" IEEE Transmission and Distribution Latin America 2002, SP, Brazil, 38p, 2002.
- [3] M. C. Tavares, J. Pisolato, and C. M. Portela, "Mode domain multiphase transmission line model - Use in transient studies," *IEEE Trans. Power Delivery*, vol. 14, pp. 1533-1544, Out. 1999.
- [4] L. M. Wedepohl, "Application of matrix methods to the solution of traveling-wave phenomena in polyphase systems," *Proc. IEE*, vol. 110, pp. 2200-2212, Dez 1963.
- [5] L. M. Wedepohl, H.V. Nguyen, G. W. Irwin, "Frequency dependent transformation matrices for untransposed transmission line using a Newton-Raphson method," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 11, pp. 1538-1546, Ago 1996.