



GSC/024

21 a 26 de Outubro de 2001
Campinas - São Paulo - Brasil

MODELO DE REPRESENTAÇÃO DE LINHA DE TRANSMISSÃO TRIFÁSICA EM CIRCUITO DUPLO COM DEPENDÊNCIA COM A FREQUÊNCIA - APLICAÇÃO EM TRANSITÓRIOS DE MANOBRA

A. J. Prado (*)

J. Pissolato Filho

M. C. Tavares

C. M. Portela

UNICAMP

Universidade de São Paulo / EESC

COPPE/UFRRJ

RESUMO

Este artigo apresenta um modelo para representar linhas de transmissão de circuito duplo, incluindo a dependência com a frequência dos parâmetros longitudinais, no domínio dos modos. Quanto à transformação modal, para a faixa de frequências de transitórios eletromagnéticos de manobra, entre 10 Hz e 10 kHz, o modelo proposto utiliza uma única matriz de transformação real. O modelo proposto é capaz de incluir a dependência com a frequência em simuladores digitais, tais como ATP, EMTP, EMTDC e MICROTRAN, através de elementos físicos de circuitos elétricos e transformadores ideais. O modelo é aplicado na análise de três alternativas de transposição para a linha dupla trifásica, bem como, na análise da linha não transposta. O modelo é denominado de modelo de Quase-modos para linhas de transmissão. Ele é aplicado em uma linha de transmissão dupla trifásica real, utilizando o simulador Microtran. Apresenta-se simulações de transitórios, tais como energização da linha e curto-circuito monofásico.

PALAVRAS-CHAVE: frequência, linha de circuito duplo, modos, transformação real, Microtran.

1.0 - INTRODUÇÃO

A maioria dos simuladores digitais de transitórios eletromagnéticos trabalha no domínio do tempo ([1]). Isto facilita a simulação de fenômenos dependentes do tempo, como o chaveamento de circuitos. Porém, uma das maiores dificuldades em estudos de transitórios eletromagnéticos é a correta representação de uma linha de transmissão ([6]). Ou seja, uma linha de transmissão não é diretamente representada no domínio do tempo, pois seus parâmetros longitudinais dependem da frequência. Este

fato determina, para cada valor de frequência, uma matriz de impedância cheia. Se esta representação utilizar uma transformação modal, os parâmetros longitudinais serão modelados no domínio dos modos ([4]). Neste caso, as matrizes modais de impedâncias serão diagonais e a dependência com a frequência pode ser introduzida com mais facilidade. A transformação modal exata de uma linha de transmissão é dependente da frequência. O modelo proposto apresenta uma transformação real e única para a análise de transitórios eletromagnéticos em linhas de transmissão. Tal transformação é baseada nas propriedades geométricas da linha e é associada com a matriz de Clarke. As propriedades geométricas são introduzidas pela soma e diferença de pares de correntes de fase ou de tensões transversais de fase (transformação média-antimédia). Isto desacopla as duas linhas trifásicas de um circuito duplo. Depois, a transformação de Clarke é aplicada, obtendo-se as matrizes modais ou de Quase-modos ([2], [5], [6], [7], [8]). Neste artigo, três tipos de transposição da linha são considerados. O passo de transposição tem um valor pequeno que permite o uso de valor médio de cada parâmetro para um ciclo de transposição. Os três tipos de transposição são denominados: completo, rotacional e operacional.

2.0 - REPRESENTAÇÃO MATRICIAL

A estrutura genérica de uma linha de transmissão dupla trifásica, com um plano de simetria vertical, é mostrada na figura 1.

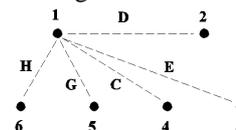


Figura 1 - Elementos mútuos das matrizes Z e Y.

(*) Rua Oscar Botossi, 320 - Bloco Tulipa - Apto 31; São José do Rio Preto – SP ; CEP : 15053-460
Telefone: (17) 2231405; Fax : (19) 37883860; e-mail: afonsoj@uol.com.br

Os cabos pára-raios são implícitos nas matrizes referentes às fases. A eliminação dos pára-raios depende de condições de contorno coerentes com tipo de conexão dos pára-raios. Neste caso, os pára-raios estão ligados galvanicamente a todas as torres, supondo-se tensão transversal nula. A matriz de impedâncias longitudinais em relação às fases, por unidade de comprimento, é apresentada a seguir. A matriz Y tem forma similar à matriz de impedâncias.

$$Z = \begin{bmatrix} A & D & E & C & G & H \\ D & A & H & G & C & E \\ E & H & B & J & L & M \\ C & G & J & I & N & L \\ G & C & L & N & I & J \\ H & E & M & L & J & B \end{bmatrix} \quad (1)$$

Com a transformação modal, esta matriz de impedâncias é transformada em uma matriz diagonal que inclui a dependência com a frequência (transformação similar aplica-se à matriz Y). A matriz modal de impedâncias é:

$$Z_{MD} = T_{FM}^{-1} \cdot Z \cdot T_{FM} \quad (2)$$

A transformação T_{FM} pode ser considerada a multiplicação de duas matrizes de transformação. Uma é baseada nas propriedades geométricas e chamada de transformação média-antimédia. Esta transformação separa os circuitos acoplados em duas linhas trifásicas desacopladas. Cada uma dessas linhas pode ser tratada por rotinas de transformação modal. Se houver um eventual pequeno erro, ao invés da manipulação de modos exatos, consideram-se Quase-modos. Neste caso, utiliza-se a outra matriz de transformação: a transformação de Clarke, que tem a importante vantagem de ser real e independente da frequência. Em alguns casos, ela introduz um pequeno erro, se os Quase-modos substituírem os modos exatos.

3.0 - TRANSFORMAÇÃO MÉDIA-ANTIMÉDIA

A transformação média-antimédia é uma transformação linear onde não há aproximações matemáticas. Esta transformação depende da existência de um eixo de simetria vertical. O principal propósito desta transformação é desacoplar os dois circuitos trifásicos de uma linha trifásica dupla. Esta transformação baseia-se nas propriedades geométricas da linha e é obtida de somas e diferenças de pares de correntes de fase ou de tensões transversais de fase ([2], [5], [8]). A figura 2 mostra o eixo de simetria para uma linha trifásica dupla.

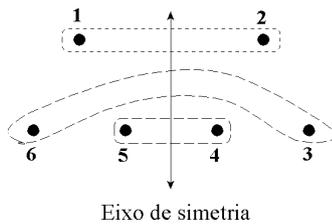


Figura 2 - Eixo simétrico de uma linha trifásica dupla.

$$T_{MA} = \begin{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{\sqrt{2}} & 0 & 0 & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & 0 \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & -\frac{1}{\sqrt{2}} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{\sqrt{2}} & 0 & 0 & -\frac{1}{\sqrt{2}} \\ 0 & 0 & 0 & -\frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & 0 \end{bmatrix} \quad \text{A matriz de transformação média-antimédia é:} \quad (3)$$

$$Z_{MA} = T_{MA} \cdot Z \cdot T_{MA}^{-1}$$

A matriz T_{MA} cria uma nova matriz de impedâncias: a matriz média-antimédia de impedâncias:

$$Z_{MA} = \begin{bmatrix} Z_M & 0 \\ 0 & Z_A \end{bmatrix} \quad (4)$$

A matriz média-antimédia é:

$$Z_M = \begin{bmatrix} A+D & E+H & G+C \\ E+H & B+M & L+J \\ G+C & L+J & I+N \end{bmatrix} \quad \text{Esta matriz pode ser separada em duas matrizes de terceira ordem que são a matriz média de impedâncias } (Z_M) \text{ e a matriz antimédia de impedâncias } (Z_A). \text{ A matriz } Z_M \text{ é:} \quad (6)$$

$$Z_A = \begin{bmatrix} A-D & E-H & G-C \\ E-H & B-M & L-J \\ G-C & L-J & I-N \end{bmatrix}$$

A matriz Z_A é:

(7)

Estas duas matrizes (em forma similar, outras duas correspondentes a matrizes Y) representam duas “linhas” trifásicas desacopladas, como indicado acima. Transformações similares são aplicadas à matriz de admitâncias transversais, por unidade de comprimento.

4.0 - TRANSFORMAÇÃO DE CLARKE

Após o desenvolvimento acima, a transformação de Clarke pode ser aplicada em cada uma das duas “linhas” trifásicas desacopladas, substituindo a transformação modal exata. A matriz de Clarke gera combinações lineares entre os elementos da matriz média e entre os elementos da matriz antimédia ([2], [5], [6], [7], [8]). A matriz de Clarke é:

$$T_{CL6} = \begin{bmatrix} T_{CL} & 0 \\ 0 & T_{CL} \end{bmatrix} \quad (8)$$

Cada linha trifásica gerada pela transformação média-antimédia será manipulada com objetivo de gerar uma representação modal da mesma. Uma otimização deste processo é compor uma matriz de sexta ordem capaz de aplicar a transformação de Clarke diretamente na matriz médi-antimédia (Z_{MA}). Esta composição será utilizada para se obter a matriz T_{FM} . A composição de sexta ordem (T_{CL6}) é:

(9)

5.0 - MATRIZ DE TRANSFORMAÇÃO

A multiplicação entre a matriz média-antimédia (T_{MA}) e a matriz de Clarke de sexta ordem (T_{CL6}) cria a matriz de transformação (T_{FM}). Procedimentos similares são aplicados a matriz Y. A matriz T_{FM} é:

$$T_{FM} = \begin{bmatrix} -\frac{1}{2\sqrt{3}} & -\frac{1}{2\sqrt{3}} & \frac{1}{\sqrt{3}} & -\frac{1}{2\sqrt{3}} & -\frac{1}{2\sqrt{3}} & \frac{1}{\sqrt{3}} \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & 0 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} & 0 \\ \frac{1}{\sqrt{6}} & \frac{1}{\sqrt{6}} & \frac{1}{\sqrt{6}} & \frac{1}{\sqrt{6}} & \frac{1}{\sqrt{6}} & \frac{1}{\sqrt{6}} \\ -\frac{1}{2\sqrt{3}} & \frac{1}{2\sqrt{3}} & \frac{1}{\sqrt{3}} & \frac{1}{2\sqrt{3}} & -\frac{1}{2\sqrt{3}} & -\frac{1}{\sqrt{3}} \\ \frac{1}{2} & -\frac{1}{2} & 0 & \frac{1}{2} & -\frac{1}{2} & 0 \\ \frac{1}{\sqrt{6}} & -\frac{1}{\sqrt{6}} & \frac{1}{\sqrt{6}} & -\frac{1}{\sqrt{6}} & \frac{1}{\sqrt{6}} & -\frac{1}{\sqrt{6}} \end{bmatrix} \quad (10)$$

Esta matriz de transformação determina duas matrizes modais de impedâncias de terceira ordem, chamadas de matriz modal média e matriz modal antimédia. Os elementos de cada matriz estão associados a um grupo de três modos. Caso não seja possível obter os modos exatos, os Quase-modos podem ser obtidos, usando a transformação citada acima. Para alguns tipos de transposição, obtém-se os modos exatos da linha. Assim, a conversão das grandezas de fases em Quase-modos (ou, eventualmente, em modos exatos), de acordo com a transformação apresentada, pode ser feita através de transformadores

$$T_{CL} = \begin{bmatrix} -\frac{1}{\sqrt{6}} & \frac{2}{\sqrt{6}} & -\frac{1}{\sqrt{6}} \\ \frac{1}{2} & 0 & \frac{1}{2} \\ \frac{1}{\sqrt{3}} & \frac{1}{\sqrt{3}} & \frac{1}{\sqrt{3}} \end{bmatrix} \begin{array}{l} \text{ideais, sendo} \\ \text{incluída em} \\ \text{programas que} \\ \text{trabalham no} \\ \text{domínio do} \end{array}$$

tempo, através de transformadores ideais. A figura 3 mostra o transformador ideal para o modo antimédio α . A matriz de transformação (T_{FM}) pode ser modelada em um programa baseado no domínio do tempo, usando transformadores ideais ([2], [3], [6], [7]).

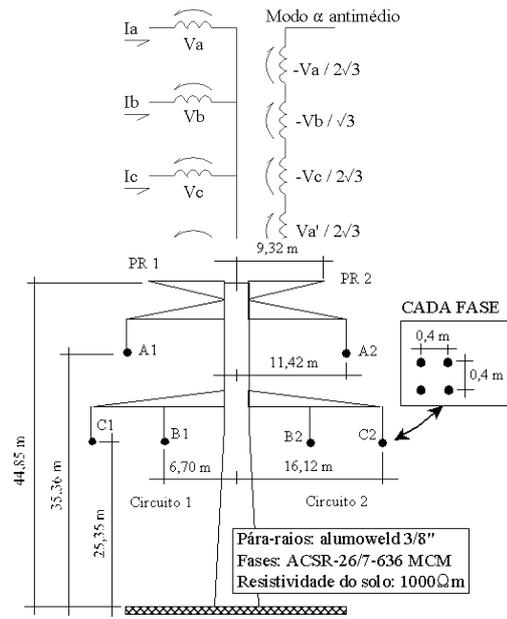


Figura 3 - Transformação para o modo antimédio α .

A matriz de transformação (T_{FM}) é uma transformação linear que é representada por transformadores ideais. Ela será aplicada nos três tipos de transposição apresentados na seção 6.

6.0 - CASO REAL E TRANSPOSIÇÃO DE LINHA

A linha real, analisada neste artigo, é uma linha dupla trifásica com tensão (RMS) de 440 kV e 160 km de extensão. A estrutura da linha é mostrada na figura 4.

Figura 4 - Estrutura de uma linha de transmissão real.

Assumindo a transposição da linha a pequenas distâncias, tem-se valores médios para as matrizes Z e

$$Z_{M\alpha\beta 0} = \begin{bmatrix} A-D & 0 & 0 \\ 0 & A-D & 0 \\ 0 & 0 & A+5D \end{bmatrix} \begin{array}{l} \text{Y, por causa de} \\ \text{ciclos completos} \\ \text{de transposição.} \end{array}$$

Outras características de simetria da linha simplificam manipulações matriciais e fazem com que, em alguns casos, os Quase-modos tornem-se modos exatos.

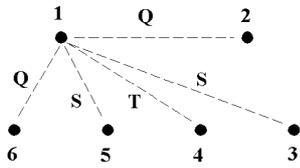
6.1 - Transposição completa

Para esta transposição, cada fase ocupa todas as posições na torre. As posições relativas entre as fases também são alteradas. Assim, todos os elementos da diagonal principal das matrizes Z e Y são iguais, como também, todos os elementos fora da diagonal principal. A matriz modal média é:

(11)

A matriz modal antimédia é:

(12)



Nas matrizes modais de impedâncias, há seis modos exatos: cinco deles com o mesmo valor e um dele

$$Z_{M\alpha\beta 0} = \begin{bmatrix} A-Q-S+T & 0 & 0 \\ 0 & A+Q-S-T & 0 \\ 0 & m\alpha & 0 \\ m\alpha\beta & m\beta & m\beta 0 \\ m\alpha 0 & m\beta 0 & m 0 \end{bmatrix} + 2S+T$$

com valor diferente

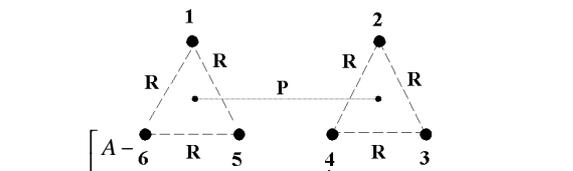
Em relação a valores médios de

impedâncias, realiza-se dois ou mais ciclos de transposição, em uma distância igual a um quarto de comprimento de onda da linha. O ciclo de transposição é dividido em intervalos iguais.

6.2 - Transposição rotacional

A transposição rotacional é similar a um tipo de transposição aplicável às linhas hexafásicas. Cada fase move-se para a posição adjacente sem haver alteração nas posições relativas entre as fases. A figura 5 mostra os elementos de acoplamento para a transposição rotacional. Neste caso, as impedâncias próprias serão representadas por A (valor médio de impedância própria).

Figura 5 - Acoplamentos após a transposição rotacional



$$Z_{A\alpha\beta 0} = \begin{bmatrix} A-6 & R & 0 \\ 0 & A-D & 0 \\ 0 & 0 & A-D \end{bmatrix}$$

(valores médios representados para uma das fases).

$$Z_{M\alpha\beta 0} = \begin{bmatrix} A-R & 0 & 0 \\ 0 & A-R & 0 \\ 0 & 0 & A+3P+2R \end{bmatrix}$$

A matriz modal média é:

(13)

$$Z_{A\alpha\beta 0} = \begin{bmatrix} \frac{3A-8P+5R}{3} & 0 & \frac{4(P-R)}{3\sqrt{2}} \\ 0 & A-R & 0 \\ \frac{4(P-R)}{3\sqrt{2}} & 0 & \frac{3A-P-2R}{3} \end{bmatrix}$$

A matriz modal

antimédia é:

(14)

Há dois conjuntos com o mesmo valor: um deles é formado pelos modos $M\alpha$ e $A\beta$. O outro conjunto é formado pelos modos $M\beta$ e $A\alpha$. A transposição rotacional não é aplicada, generalizadamente, em casos reais de linhas trifásicas duplas, pois em um circuito duplo trifásico, cada circuito sofre transposição independente do outro.

6.3 - Transposição operacional

A maior parte dos casos reais de transposição de linhas trifásicas duplas pode ser representada pela transposição operacional. Neste caso, cada circuito trifásico é idealmente transposto, de forma a gerar um

único valor de acoplamento entre os cabos de um mesmo circuito.

$$Z_{A\alpha\beta 0} = \begin{bmatrix} A-Q-S-T & 0 & 0 \\ 0 & A-Q-S+T & 0 \\ 0 & 0 & A \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -2Q+2S & \alpha\alpha\beta \\ \alpha\alpha\beta & a\beta & a\beta 0 \\ \alpha\alpha 0 & a\beta 0 & a 0 \end{bmatrix}$$

Gera-se outro valor de acoplamento entre cabos de circuitos diferentes. A impedância própria é representada por A (valor médio).

Figura 6 - Acoplamentos após a transposição operacional (valores médios).

A matriz modal média é:

(15)

A matriz modal antimédia é:

(16)

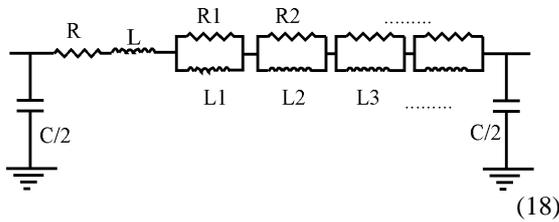
Três modos têm o mesmo valor ($M\alpha$, $M\beta$ e $A\beta$) e três modos são diferentes. Entretanto, há um acoplamento entre os Quase-modos $A\alpha$ e $A 0$, sendo que estes Quase-modos não são modos exatos. Se os elementos de acoplamento não forem considerados, o resultado será uma matriz diagonal.

6.4 - Linha não transposta

Para a linha não transposta, os acoplamentos entre as fases têm valores diferentes. Este caso pode ser representado pela figura 1 e pelas equações 6 e 7 (média e antimédia). Se a transformação de Clarke for aplicada nestas matrizes, as matrizes de impedâncias não serão diagonais ([5]). Usando uma representação simplificada, a matriz média é:

(17)

A matriz antimédia é:



As matrizes modais de impedâncias são simétricas e não são diagonais. Há impedâncias de acoplamento entre todos os Quase-modos. Para a linha não transposta, os Quase-modos não são modos exatos.

Esta análise de tipos de transposição tem por objetivo o estudo dos parâmetros de uma linha de transmissão dupla trifásica de circuito duplo, quando representada no domínio dos modos. Assim, os

$$\begin{bmatrix} V_{A1} \\ V_{B1} \\ V_{C1} \\ V_{A2} \\ V_{B2} \\ V_{C2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -0,5 \\ 1 \\ -0,5 \\ -0,5 \\ 1 \\ 0,5 \end{bmatrix} \Rightarrow \begin{bmatrix} V_{M\alpha} \\ V_{M\beta} \\ V_{M0} \\ V_{A\alpha} \\ V_{A\beta} \\ V_{A0} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

extremos desta análise são a transposição completa e a linha sem transposição.

7.0 - CIRCUITOS SINTÉTICOS

Os Quase-modos transformaram a linha dupla trifásica em seis circuitos monofásicos modais desacoplados (com um eventual erro quando eles não são modos exatos). Esta transformação é aplicada através de transformadores ideais em programas, tais como, EMTP, ATP, EMTDC e MICROTRAN. Para isto, as seis linhas modais são representadas por circuitos sintéticos. Estes circuitos são circuitos π modificados que têm a seguinte estrutura:

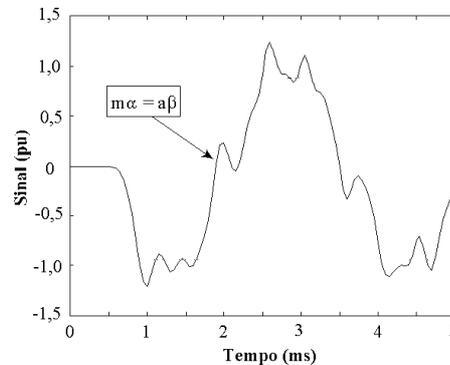
- a) circuito RL em série que representa baixas frequências;
- b) circuitos RL em paralelo, que, em conjunto com o circuito em série, representam a dependência com a frequência dos parâmetros longitudinais;
- c) dois ramos com capacitores (C/2), para representação dos parâmetros transversais.

Para cada modo, o número de circuitos em paralelo depende da faixa de frequência analisada e da precisão desejada. Estes elementos são obtidos considerando-se os intervalos de frequência escolhidos e, para cada intervalo, leva-se em conta a média geométrica dos valores de frequência. A figura 7 mostra uma unidade de circuito sintético. A quantidade necessária dessas unidades para representação da extensão total da linha depende de qual faixa de frequência é importante para o fenômeno simulado.

Figura 7 - Unidade de circuito π modificado.

O modelo proposto usa, para uma boa precisão nos testes apresentados, 5 circuitos paralelos para o modo homopolar e 4 circuitos para os outros modos.

8.0 - TESTES DE PROPAGAÇÃO DE SINAIS



Quando as grandezas de fase são multiplicadas pelas matrizes de transformação, obtém-se as grandezas de modos, como no exemplo a seguir.

(19)

Se as grandezas de fase correspondem a um único modo, então apenas este modo não será nulo. Sinais proporcionais aos elementos das matriz de transformação podem testar a representação da matriz de transformação através de transformadores ideais. Se os sinais propagados têm a mesma proporção do sinais iniciais, a matriz de transformação (T_{FM}) está representada corretamente por transformadores ideais.

Como exemplo, a figura 8 mostra o teste para tensões correspondentes ao modo médio α. Foram usados os sinais da primeira linha de T_{FM} e o terminal de recepção é mantido em aberto. A transposição de linha é a operacional. Os sinais são degraus de tensão.

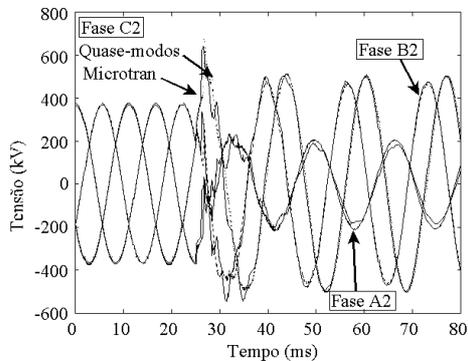
Figura 8 - Resultados do teste de propagação ($M\alpha$)

Na figura 8, observa-se a manutenção da mesma proporção entre os sinais recebidos e os sinais de entrada. O uso de transformadores ideais gera uma correta representação para a matriz de transformação. Um outro teste é aplicado para o estudo dos circuitos sintéticos (figura 9).

Figura 9 - Testes dos circuitos sintéticos.

Se o mesmo sinal inicial é aplicado em modos diferentes, os sinais propagados deverão ser iguais para os modos que apresentam valores de impedância

iguais, para a transposição utilizada. Na figura 9, utiliza-se o mesmo sinal para a fase A_1 (degrau de tensão com 0,5 pu) para os modos $M\alpha$ e $A\beta$. A transposição de linha é a operacional. Neste caso, os valores dos elementos dos circuitos sintéticos são



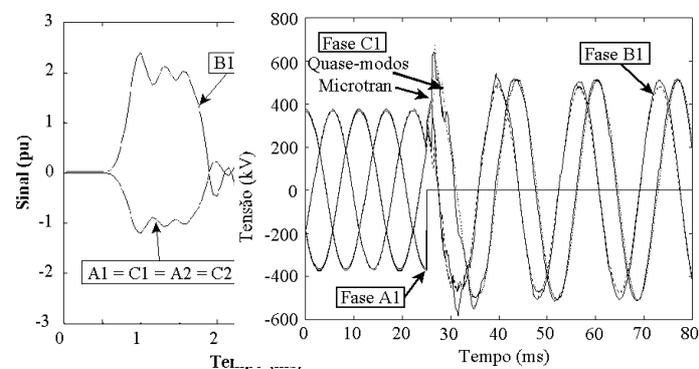
corretos para a representação da linha com transposição operacional.

9.0 - SIMULAÇÕES DE TRANSITÓRIOS

A simulação de um curto-circuito inicia-se com a solução em regime permanente e a falta é aplicada na fase A_1 , quando esta atinge seu pico negativo. A falta ocorre no final da linha. A tensão de regime permanente é 440 kV (RMS) e a frequência é 60 Hz. A figura 10 mostra os resultados para o circuito trifásico onde ocorre a falta, utilizando a transposição operacional da linha dupla trifásica, representados com o modelo interno dependente da frequência do Microtran (fdData) e com o modelo dos Quase-Modos. Figura 10 - Simulação de falta para a transposição operacional (circuito 1)

Já a figura 11, mostra as conseqüências, sobre circuito 2, da falta aplicada no circuito 1. O caso analisado nesta figura e na figura anterior (figura 10) mostra uma situação em que o local de ocorrência da falta é também o local de medida de tensão.

Figura 11 - Efeitos de falta para a transposição operacional (circuito 2).



O fdData (Microtran) utiliza os autovetores exatos para calcular uma matriz de transformação referente a frequência de 10 kHz. A resistividade do solo é de 1000 Ω .m. O modelo de Quase-modo utiliza o mesmo valor de resistividade do solo. A linha simulada tem comprimento de 160 km.

10.0 - CONCLUSÕES

Uma linha de transmissão trifásica dupla real é representada através do modelo dos Quase-Modos que trabalha no domínio dos modos e utiliza uma única matriz de transformação real. A matriz de transformação aproveita as características geométricas da linha de transmissão e está associada a transformação de Clarke. A matriz de transformação pode ser representada por transformadores ideais em simuladores digitais que trabalham no domínio do tempo. A dependência com a frequência dos parâmetros longitudinais no domínio dos modos é introduzida por circuitos π modificados, compostos por um circuito RL em série e diversos circuitos RL em paralelo, responsáveis pela representação da dependência com a frequência. Três diferentes tipos de transposição de linha são analisados : completo, rotacional e operacional. Apenas para a matriz modal antimédia da transposição operacional, não ocorre diagonalização. No caso da transposição operacional, o modelo de Quase-modos é uma razoável aproximação para os modos exatos.

Testes de propagação de sinais e simulações de falta, demonstram que o modelo proposto é apropriado para a representação de uma linha trifásica de circuito duplo dependente da frequência. A principal característica do modelo proposto é realizar esta representação, através de transformadores ideais e circuitos π modificados, em simuladores que trabalham no domínio do tempo.

11.0 - AGRADECIMENTOS

Os autores gostariam de agradecer o apoio recebido da FAPESP e da CAPES.

12.0 - REFERÊNCIAS

- [1] H.W. Dommel, "Eletromagnetic Transients Program - Rule Book, Oregon, 1984.
- [2] M.C.D. Tavares, "Linha de Transmissão Hexafásica - Características de Propagação e Comportamento da Linha a Frequência Industrial e Transitórios Eletromagnéticos", Tese de Mestrado, UFRJ/COPPE, Brasil, 820 páginas, 1991.
- [3] Microtran Power System Analysis Corporation, Transients Analysis Program Reference Manual, Vancouver, Canada, 1992.
- [4] J.A. Brandão Faria e J. Briceño Mendez, "On the Modal Analysis of Asymmetrical Three-phase Transmission Lines using Standard Transformation Matrices, IEEE Winter Meeting, 97WMIEEE-PES, 1997.

- [5] M.C. Tavares, J. Pissolato e C.M. Portela, "New Mode-domain Multiphase Transmission Line Model - Clarke Transformation Evaluation", 1998 International Conference on Power Systems Technology (Powercon'98), pp. 860-864.
- [6] M.C. Tavares, J. Pissolato e C.M. Portela, "New Mode-domain Representation of Transmission Line for Power Systems Studies", 1998 International Symposium on Circuits and Systems (ISCAS'98), vol. III, pp. 501-504.
- [7] M.C. Tavares, J. Pissolato e C.M. Portela, "New Multiphase Mode Domain Transmission Line Model", International Journal of Electrical Power and Energy Systems, vol. 21, no. 8, November 1999.
- [8] M.C. Tavares, J. Pissolato e C.M. Portela, "Mode Domain Multiphase Transmission Line Model - Use in Transient Studies", IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 14, October 1999, pp. 1533-1544.