

ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DA CONFIGURAÇÃO DO ALIMENTADOR NAS IMPEDÂNCIAS DE FASE DAS LINHAS ELÉTRICAS DE DISTRIBUIÇÃO

FELIPE H. GARCÍA, MARIO O. OLIVEIRA, RENATO G. FERRAZ, ARTURO S. BRETAS

*Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul –UFRGS
Av. Osvaldo Arana 103, CEP 90035-190, Porto Alegre, RS, Brasil*

*E-mails: fhdez@ece.ufrgs.br, moliveira@aece.ufrgs.br, rferraz@ece.ufrgs.br
abretas@ece.ufrgs.br*

Abstract— This paper present a numerical study of the feeder configuration influence on the phase impedance matrix components of the distribution line. As variables for analysis were used the phase and neutral conductor spacing on the structure of the distribution power system. Furthermore, different conductor were used in analyse to checking the conductor type influence. The results obtained showed that different phase-neutral conductors' combinations can lead to similar phase impedance in the electric line. On other hand, it was found that the mutual impedances of the electric line change significantly with the displacement of the phase conductors and the neutral conductor displacement alters the impedance phase value. The results of this study were verified using the routine "Cable Constant" of the simulator ATP (Alternative Transient Program)

Keywords— Distribution power system, self and mutual impedance, feeder configuration

Resumo— Este artigo apresenta um estudo numérico sobre a influência da configuração do alimentador nas componentes da matriz impedância de fase de uma linha de distribuição. Como variável de análise utilizou-se o espaçamento entre os condutores de fase e de neutro em uma estrutura de um sistema de distribuição de energia. Além disso, diferentes condutores foram utilizadas na análise aos fins de verificar a influência do tipo condutor. Os resultados obtidos mostraram que diferentes combinações de condutores fase-neutro podem levar a impedâncias de fase semelhantes na linha elétrica. Por outro lado, verificou-se que as impedâncias mútuas da linha alteram-se significativamente com o deslocamento dos condutores de fase e que o deslocamento do condutor de neutro altera o valor das impedâncias de fase. Os resultados deste estudo foram verificados utilizando-se como referência a rotina "Cable Constant" do simulador ATP (*Alternative Transient Program*).

Palavras-chave— Sistemas elétricos de distribuição, impedâncias próprias e mútuas, configuração do alimentador.

1 Introdução

As linhas aéreas de transmissão e distribuição de energia têm um papel fundamental nos Sistemas Elétricos de Potência (SEP), sendo necessária uma correta caracterização das mesmas sob o ponto de vista das grandezas e parâmetros elétricos. Em aplicações práticas, todos os condutores de uma linha de transmissão e/ou distribuição encontram-se alocados a uma distância finita da superfície da terra, podendo-se usar a mesma como caminho de retorno. Assim, é importante considerar as características geométricas dos condutores quando são calculados os parâmetros das linhas elétricas (Gómez-Expósito, 2009). A resistência dos condutores gera perdas na linha e a reatância, fração dominante na impedância série, está diretamente relacionada com a capacidade da linha para transmitir energia. Ambos os parâmetros estão diretamente relacionados com o efeito pelicular, dependente da frequência, e com o efeito de proximidade dos condutores na linha dependente da configuração do alimentador (Berleze e Robert, 2003). Comumente as linhas são constituídas por mais de um condutor, ao qual estará associada sua impedância série e impedâncias mútuas relacionadas com os outros condutores. Ambas as impedâncias são influenciadas pelas características do solo e pela corrente de retorno por terra (Kurokawa, et al. 2005; Machado, et al. 1990).

A corrente elétrica que percorre um condutor gera quedas de tensão nos condutores adjacentes devi-

do ao acoplamento mútuo entre os mesmos. A magnitude destas quedas de tensão depende das impedâncias mútuas da linha, que por sua vez depende da geometria e das características físicas do alimentador. Para equilibrar as impedâncias mútuas em linhas de transmissão realiza-se uma transposição dos condutores ao longo da linha, no entanto, ditas transposições podem influenciar no comportamento dos fenômenos transitórios eletromagnéticos (Elguera e Tavares, 2006). Por outro lado, a variação não linear da resistência e indutância com a frequência é importante ao ponto de que os modelos a serem utilizados para a representação dos cabos elétricos devem considerar este efeito (Kurokawa, et al. 2001; Moreira et al. 2002; Oliveira, et al. 1996; Akke e Biro, 2005). Os parâmetros elétricos longitudinais (resistências e indutâncias) e transversais (capacitâncias) por unidade de longitude de uma linha elétrica mudam quando da variação das características dos cabos e da configuração do alimentador devido a fenômenos de indução eletromagnética. Neste sentido, Horton (Horton, et al. 2006) e Tiebing (Tiebing, et al. 2007) apresentaram estudos relacionados à indução de tensão causada por campos elétricos em linhas de transmissão próximas. Por outro lado, Ghijsselem (Gijselem, et al. 2003) avalia a influência do tipo de configuração do alimentador de sistemas de distribuição sob a ressonância harmônica.

Neste contexto, este artigo apresenta um estudo numérico da matriz impedância de fases de um sistema elétrico de distribuição em função da configuração do alimentador. A altura dos condutores na

estrutura de suporte e a distância horizontal entre as fases e a terra foram modificadas e observou-se a variação das componentes da matriz de impedâncias através de um estudo numérico.

2 Impedâncias Próprias e Mútuas das Linhas Elétricas

Em SEP equilibrados que atendem cargas balanceadas, as correntes na linha circulam apenas pelas fases, entre as quais existem acoplamentos mútuos. No entanto, para SEP trifásicos com neutro que atende cargas desequilibradas parte da corrente circula através do neutro e do próprio solo, originando-se assim acoplamentos mútuos entre as fases e o neutro e entre todos os condutores da linha e o solo. A Figura 1 mostra um trecho de linha de distribuição trifásica com neutro e sem carga onde cada condutor é representado por sua impedância própria ou série, z'_{ii} . Também são representados os acoplamentos mútuos, em forma de impedâncias mútuas, z'_{ij} .

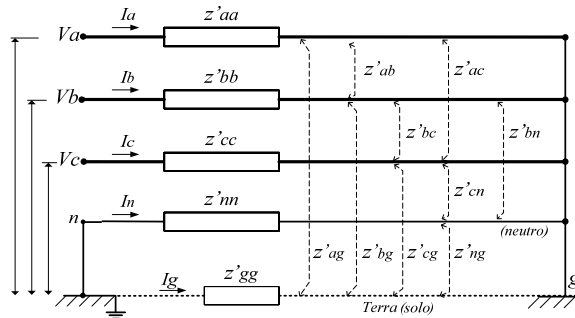


Figura 1. Representação de uma linha elétrica trifásica com condutor de neutro e sem carga.

As equações de Carson (1926) permitem determinar as impedâncias próprias e mútuas dos condutores em uma linha elétrica com retorno por terra, sendo aplicadas na prática através de duas equações modificadas (Kersting, 2002):

- Impedância própria:

$$z_{ii} = r_i + j0.12134 \ln \left(\frac{1}{RMG_i} + 7.93402 \right) \quad (1)$$

onde z_{ii} é a impedância própria do condutor i , e RMG_i representa o Rádío Médio Geométrico;

- Impedância mútua:

$$z_{ij} = 0.09530 + j0.12134 \ln \left(\frac{1}{D_{ij}} + 7.93402 \right) \quad (2)$$

onde z_{ij} é a impedância mútua entre condutores i e j , e D_{ij} representa a distância entre os condutores i e j ,

Nas equações (1) e (2), estão considerados, além das impedâncias z'_{gg} e z'_{ig} , a frequência da rede e a indutância dos condutores. No estudo dos SEP os circuitos elétricos são simplificados, considerando o solo como um condutor ideal, que não oferece resistência ao passo da corrente elétrica. Esta simplifi-

ção é possível porque as impedâncias relacionadas com o solo (z'_{gg} e z'_{ig}) estão consideradas nas impedâncias das fases.

Com estas simplificações, o sistema de equações para a linha elétrica mostrada na Figura 1 é dado pela seguinte matriz de impedâncias onde não está presente a equação correspondente ao solo:

$$z = \begin{bmatrix} z_{aa} & z_{ab} & z_{ac} & z_{an} \\ z_{ba} & z_{bb} & z_{bc} & z_{bn} \\ z_{ca} & z_{cb} & z_{cc} & z_{cn} \\ z_{na} & z_{nb} & z_{nc} & z_{nn} \end{bmatrix} \quad (3)$$

onde a, b e c , representam as fases e n o neutro.

Com a consideração do solo como um condutor ideal o condutor do neutro terá uma diferença de potencial de 0 V entre seus terminais aterrados. Desta forma, uma nova simplificação pode ser introduzida consistente em eliminar a equação correspondente ao neutro em (3), através da técnica de redução de Kron (Kron, 1939), que estabelece:

$$Z_{pq} = z_{pq} - \frac{z_{pn} z_{nq}}{z_{nn}} = z_{pq} - y_{nn} z_{pn} z_{nq} \quad (4)$$

onde p e q representam às fases a, b ou c , e y_{nn} é a admitância própria do neutro.

Assim, aplicando (4) em (3) resulta uma matriz de impedâncias equivalentes de fases do tipo:

$$Z = \begin{bmatrix} Z_{sa} & Z_{ab} & Z_{ac} \\ Z_{ba} & Z_{sb} & Z_{bc} \\ Z_{ca} & Z_{cb} & Z_{sc} \end{bmatrix} \quad (5)$$

onde Z_{si} representa a impedância própria equivalente do condutor da fase i e Z_{ij} a impedância mútua equivalente entre os condutores das fases i e j . Considerando a reciprocidade da impedância mútua tem-se que $Z_{ij} = Z_{ji}$.

3 Estudo de Caso

Os efeitos da configuração do alimentador sobre as impedâncias de fases são avaliados através da modificação gradual do espaçamento entre os condutores mostrados na estrutura da Figura 2.

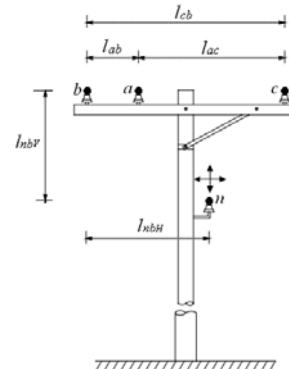


Figura 2. Configuração geométrica utilizada no estudo de caso.

Nesta análise, o condutor da fase *b* permanece fixo enquanto os outros condutores são deslocados nas faixas de comprimentos indicadas na Tabela 1.

Tabela 1. Variação das distâncias entre condutores (fase *b* fixa).

Condutor deslocado	Espaçamento (pé)				
	l_{ab}	l_{ac}	l_{cb}	l_{nbH}	l_{nbV}
<i>a</i> (H)	0,5–6,5	6,5–0,5	7,0	3,5	4,0
<i>c</i> (H)	1,0	0,5–6,0	1,5–7,0	4,0	4,0
<i>n</i> (H)	3,5	3,5	7,0	0–7,0	4,0
<i>n</i> (V)	3,5	3,5	7,0	3,5	0,5–7,0

* H: horizontal, V: vertical.

Para este estudo são considerados os 3 condutores mostrados na Tabela 2.

Tabela 2. Dados dos condutores utilizados na análise.

#	Nº	Condutor	Tipo	RMG (mm)	<i>r</i> (Ω/mi)
1	1/0	6/1	ACSR	1,36	1,1200
5	556.5	26/7	ACSR	9,54	0,1859
6	795.0	26/7	ACSR	11,43	0,1288

Os termos *impedância mútua* e *impedância própria* dos condutores serão utilizados nas seções seguintes fazendo referência à equação (5). No entanto, é importante lembrar que estes valores correspondem a impedâncias equivalentes.

4 Resultados das Simulações

A equação (5) representa a matriz de impedâncias da linha elétrica estudada. Conforme (4) quaisquer das impedâncias definidas em (5) dependem, além do condutor empregado nas fases, do condutor do neutro. Dessa forma, os resultados mostrados neste trabalho consideram tanto o condutor das fases quanto o condutor do neutro. Na legenda das próximas figuras serão utilizados os símbolos Ph e Ne para identificar as fases e o neutro, respectivamente. Os condutores são referenciados pelo número correspondente a sua fileira na Tabela 2, por exemplo, Ph6 identifica o cabo 795.0 da família ACSR 26/7 na condição de condutor de fase, enquanto Ne1 identifica o cabo 1/0 ACSR 6/1 operando como neutro.

4.1 Deslocamento do condutor da fase ‘a’

A Figura 3 mostra a variação da impedância própria Z_{sa} (em módulo) quando o condutor da fase *a* muda sua posição no alimentador, permanecendo fixos os condutores das outras fases e do neutro. Observa-se que a impedância própria Z_{sa} não muda significativamente com o deslocamento do condutor da fase, no entanto verifica-se que cabos de maior resistência e menor RMG utilizados como neutros conduzem a impedâncias próprias maiores.

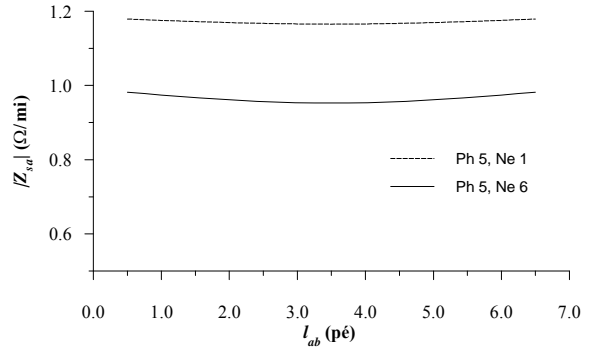


Figura 3. Variação da impedância própria Z_{sa} quando o condutor da fase *a* desloca-se horizontalmente.

A Figura 4 mostra o comportamento das impedâncias próprias, Z_s , e mútuas, Z_m , nas fases da linha quando considerado apenas um tipo de condutor para as fases e vários tipos de condutores para o neutro. Novamente observa-se que as menores impedâncias correspondem ao neutro de menor resistência.

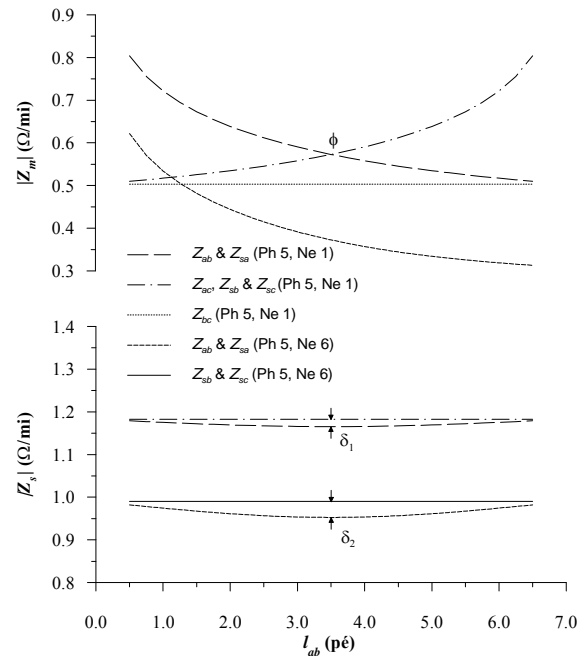


Figura 4. Variação das impedâncias próprias e mútuas da linha em função do deslocamento da fase *a* para diferentes combinações de condutores.

Para qualquer combinação de condutores a impedância Z_{sa} manifesta um comportamento “parabólico” com o deslocamento, com valor mínimo quando o condutor da fase *a* está mais próximo do neutro (em $l_{ab} = 3,5$ pé). Os condutores das fases *b* e *c* permanecem fixos e, portanto Z_{sb} e Z_{sc} são constantes e de igual valor ($Z_{sb} = Z_{sc} = 0,99$ Ω/mi para Ph5–Ne6, por exemplo).

A impedância Z_{sa} é sempre diferente das impedâncias Z_{sb} e Z_{sc} . A diferença não é constante devido ao comportamento parabólico de Z_{sa} e atinge seu valor máximo na metade do deslocamento (ver δ_1 e δ_2). A diferença também não é a mesma em todas as combinações Ph-Ne, e aumenta na medida em que

diminui a resistência do condutor do neutro (por exemplo, $\delta_2 > \delta_1$).

Caso o neutro não estivesse em 3,5 pé, Z_{sb} e Z_{sc} não seriam iguais, mas ainda seriam constantes. O comportamento de Z_{sa} também seria parabólico, com valor mínimo quando os condutores da fase e do neutro estivessem alinhados verticalmente.

As impedâncias mútuas diminuem com o aumento do espaçamento entre os condutores e esta diminuição está influenciada pelo neutro. A dispersão, ou diferença entre os extremos da curva para a combinação Ph5-Ne6 é superior à curva da combinação Ph5-Ne1, o que significa que a diferença é maior quanto maior for a o RMG do neutro. A impedância mútua Z_{bc} permanece constante e as impedâncias Z_{ac} e Z_{ab} variam de forma oposta, apresentando os mesmos valores máximos e mínimos, com um valor comum na metade do espaçamento (ponto ϕ). Observa-se que em qualquer posição do deslocamento, as indutâncias mútuas têm valores superiores a 0,50 Ω/mi . Considerando ainda que com a combinação Ph5-Ne1 as impedâncias próprias das fases ficam em torno de 1,18 Ω/mi verifica-se que existe uma proporção de, no mínimo, 42% entre as indutâncias próprias e mútuas.

4.2 Deslocamento do condutor da fase 'c'

A Figura 5 ilustra o comportamento do absoluto das impedâncias próprias e mútuas devido ao deslocamento do condutor da fase *c* para dois tipos de condutores de neutro.

Os comportamentos guardam algumas semelhanças com o caso anterior. Por exemplo, verifica-se a relação direta entre a resistência do condutor de neutro e as impedâncias, assim como a variação parabólica da impedância própria da fase em deslocamento (Z_{sc}). Neste caso Z_{sa} e Z_{sb} são constantes, porém de valores diferentes devido à posição respeito ao neutro (por exemplo, $Z_{sa} = 1,1693 \Omega/\text{mi}$ e $Z_{sb} = 1,1863 \Omega/\text{mi}$, para a combinação Ph5-Ne1). A diferença entre estas impedâncias é constante e pequena, sendo maior entre elas e Z_{sc} . Neste sentido, observa-se que quanto maior é o RMG do condutor do neutro, maior é essa diferença. Assim, para a combinação Ph5-Ne1 as diferenças são tão pequenas que, em seu comportamento parabólico, Z_{sc} iguala-se a Z_{sa} em dois pontos (ϕ e λ). Para a combinação Ph5-Ne6 as diferenças são maiores e as impedâncias próprias nunca são iguais.

Para a combinação Ph5-Ne1 a Figura 5 mostra também as impedâncias mútuas Z_{ab} e Z_{ac} . A impedância mútua Z_{ab} permanece constante e Z_{ac} e Z_{bc} diminuem na medida em que aumenta o espaçamento entre os condutores correspondentes. Quando o condutor da fase *c* está a 1 pé da fase *a* os espaçamentos l_{ab} e l_{ac} são iguais, não entanto, as impedâncias mútuas Z_{ab} e Z_{ac} são diferentes, devido a que o neutro não está localizado na metade desse espaçamento. A igualdade entre as impedâncias acontece antes de

$l_{ac} = 1$ pé (ponto η). Até o ponto η a impedância Z_{ab} é menor que a impedância Z_{ac} , entretanto, até esse ponto l_{ab} é maior do que o espaçamento l_{ac} . Por outra parte, até $l_{ac} = 3$ pé o neutro está localizado à direita das três fases. Neste caso, a proporção entre as impedâncias próprias e mútuas é superior a 30%.

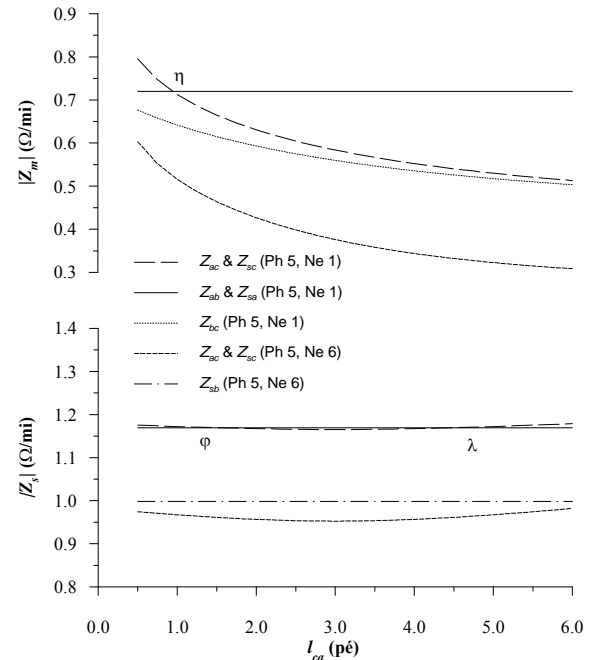


Figura 5. Variação das impedâncias próprias e mútuas segundo deslocamento da fase *c* considerando diferentes condutores de neutro.

4.3 Deslocamento vertical do condutor de neutro

A Figura 6 mostra a variação das impedâncias da linha devido ao deslocamento do condutor de neutro na direção vertical. As curvas correspondem às combinações Ph5-Ne1 e Ph5-Ne6. Ao igual que nas simulações prévias, as impedâncias próprias e mútuas são também influenciadas pelo neutro, adotando maiores valores para maiores resistências e vice-versa.

Nesta simulação as impedâncias próprias Z_{sb} e Z_{sc} manifestam a menor variação, sendo que as fases *b* e *c* são as mais afastadas do neutro. Estas impedâncias são iguais dado que os condutores são simétricos respeito ao neutro. A variação da impedância Z_{sa} é maior, observando-se diferenças com as outras impedâncias próprias, estando a magnitude das diferenças diretamente relacionada com o RMG do neutro. Além disto, as diferenças são máximas quanto mais próximo está o neutro das fases.

Em relação às impedâncias mútuas, observa-se que a menor variação é experimentada entre aquelas correspondentes às fases mais afastadas do neutro, que ao mesmo tempo são as fases mais afastadas entre si (Z_{bc}). Por outra parte, a Figura 6 revela que em determinadas condições é possível conseguir que as três impedâncias mútuas sejam iguais, o que seria equivalente a realizar a transposição dos condutores

na linha elétrica. Nota-se que isto acontece para a combinação Ph5–Ne6 quando o deslocamento do neutro é em torno de 1,1 pé (ponto σ).

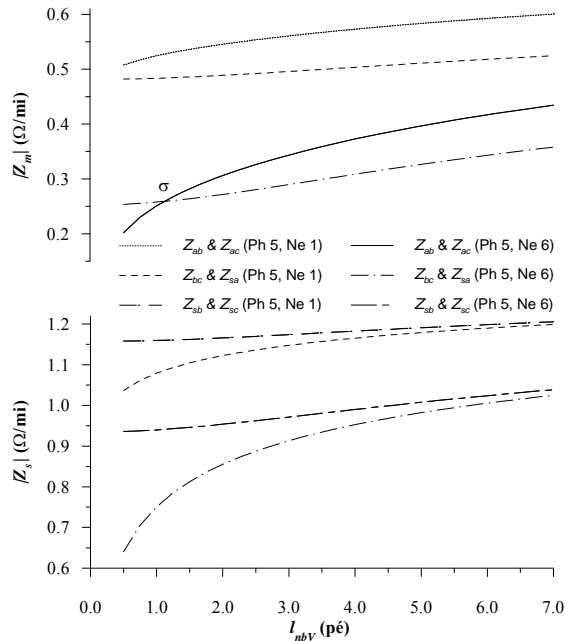


Figura 6. Variação das impedâncias próprias e mútuas segundo deslocamento vertical do neutro para dois tipos de condutores de neutro.

4.4 Deslocamento horizontal do condutor de neutro

Na Figura 7 são mostradas as curvas do absoluto das impedâncias correspondentes às combinações Ph5-Ne1 e Ph5-Ne6 para deslocamentos do neutro na direção horizontal. Como nos casos anteriores observa-se a relação direta entre a resistência do neutro e as impedâncias próprias e mútuas das fases da linha. Em ambas as combinações de condutores a impedância própria das fases é mínima quando o neutro se encontra embaixo das mesmas, ou seja, quando as fases e o neutro estão alinhados verticalmente, em cujos casos também é mínima a distância entre eles.

Desse modo, a impedância Z_{sc} é máxima na origem do deslocamento do neutro e máxima quando este alinha-se verticalmente com a fase c . Já a impedância Z_{sb} apresenta o comportamento oposto, devido ao qual, na metade do deslocamento ambas as impedâncias igualam-se (ponto μ , por exemplo). Nessa posição, a impedância própria Z_{sa} é mínima, pois a fase a encontra-se alinhada com o neutro. Por outro lado, durante o deslocamento, em dois pontos, a impedância própria da fase a iguala-se com a impedância própria das outras fases (por exemplo, pontos ξ e ψ), no entanto, em nenhum caso estas três impedâncias são iguais.

A impedância mútua Z_{bc} manifesta o mesmo comportamento que a impedância própria da fase a sendo mínima quando o neutro encontra-se na metade do deslocamento. Semelhantemente, quando o neutro encontra-se na metade dos intervalos $a-b$ e $a-c$, as impedâncias mútuas Z_{ab} e Z_{ac} , respectivamente,

observam seus valores mínimos. Os valores máximos destas impedâncias acontecem quando o neutro encontra-se nos extremos opostos dos intervalos correspondentes, isto é, alinhado verticalmente com a fase que não forma parte dos intervalos. Na metade do deslocamento as impedâncias mútuas Z_{ab} e Z_{ac} adotam valores iguais (por exemplo, ponto δ).

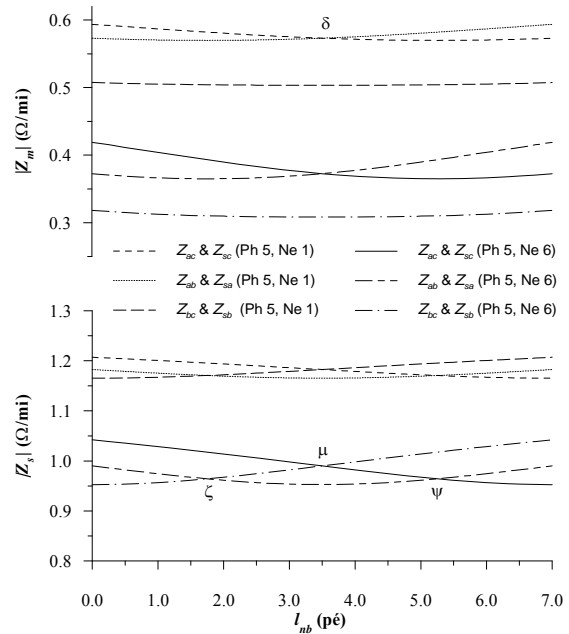


Figura 7. Variação das impedâncias próprias e mútuas segundo deslocamento horizontal do neutro para dois tipos de condutores de neutro.

5 Discussão

Observou-se ao longo das simulações que a impedância própria de alguma das fases muda com o deslocamento de algum dos condutores. As impedâncias próprias resultam mínimas quando é mínimo o espaçamento entre estas e o neutro. No entanto, a equação (1) indica que não existe influência do espaçamento na impedância própria. Por outra parte, a Figura 4 e Figura 5 mostram que as impedâncias mútuas entre as fases são máximas quando é mínimo o espaçamento entre seus condutores, entretanto a Figura 7 mostra que as impedâncias mútuas também são mínimas quando é mínimo o espaçamento das fases com relação ao neutro. Estas divergências devem-se ao processo matemático da modelagem e não a contradições físicas.

Conforme apresentado na equação (4), em cada uma das componentes da matriz impedâncias em (5) estão consideradas as impedâncias relacionadas com o neutro, embora em (5) não apareçam explicitamente. Com o deslocamento de qualquer condutor mudarão as impedâncias mútuas entre este condutor e os outros que permanecerem fixos, isto é, z_{ij} e z_{in} se for deslocado um condutor da fase i (onde j representa às outras duas fases) e z_{in} se for deslocado o condutor do neutro (onde i representa às três fases).

Com o deslocamento da fase a , por exemplo, as impedâncias mútuas z_{bn} e z_{cn} não são afetadas e, portanto, as impedâncias equivalentes próprias Z_{sb} e Z_{sc} e a mútua Z_{bc} , permanecem constantes, como mostra a Figura 4. No entanto, z_{an} muda com o deslocamento, aumentando ou diminuindo conforme aproxima-se ou afasta-se do neutro, respectivamente, mudando o subtraendo em (2), o qual altera a impedância equivalente Z_{sa} .

No início do deslocamento, Z_{ab} é máxima porque é máxima z_{ab} . Com o deslocamento diminui z_{ab} , e aumenta z_{an} até $l_{ab} = 3,5$ pé, com o que diminui Z_{ab} . A partir dessa posição, z_{an} começa a diminuir, no entanto isto não faz crescer a Z_{ab} , porque z_{ab} continua diminuindo em maior proporção fazendo com que Z_{ab} continua diminuindo, até atingir seu valor mínimo no fim do deslocamento.

A impedância mútua Z_{ac} manifesta um comportamento oposto, porque z_{ac} é mínima no início e cresce na medida em que a fase a aproxima-se da fase c . Na metade do deslocamento z_{ab} e z_{ac} são iguais e, portanto, são iguais Z_{ab} e Z_{ac} .

Durante o deslocamento do neutro na direção vertical, aumentam ou diminuem as impedâncias z_{in} e, portanto, diminuem ou aumentam as impedâncias equivalentes próprias e mútuas determinadas com (4), conforme mostra a Figura 6. Estas argumentações também são válidas para explicar os resultados de outros deslocamentos.

As impedâncias próprias e mútuas são determinadas através de expressões onde estão envolvidas funções logarítmicas. Desse modo, variações constantes do espaçamento não provocam variações constantes nas impedâncias, sendo estas pequenas em determinados trechos ou muito acentuadas, como nos extremos dos deslocamentos. No entanto, pequenos deslocamentos em torno de uma determinada posição não provocam variações muito significativas das impedâncias.

Em um sistema elétrico real o afastamento entre as fases ou a aproximação entre estas e o neutro provocam o aumento das correntes na linha, e vice-versa. Isto é adequadamente acompanhado pelo modelo estudado, onde aumentam ou diminui as impedâncias equivalentes para permitir a diminuição ou o aumento das correntes na linha.

6 Conclusões

Este artigo apresentou uma análise numérica sobre a variação das impedâncias próprias e mútuas de uma linha elétrica de distribuição aérea, em função da configuração do alimentador. Para este estudo, considerou-se uma linha trifásica com neutro e retorno por terra, modelada através da sua matriz de impedância. A matriz de impedância original foi reduzida a uma matriz equivalente com auxílio da técnica de redução de Kron.

Dado que o neutro forma parte do caminho percorrido pela corrente elétrica, a sua impedância influencia no valor das componentes da matriz de impedância equivalente da linha. A influência é direta, de modo que, para um dado condutor de fases, as impedâncias serão menores quando menor for a resistência do neutro (ou quanto maior for seu RMG), e vice-versa.

Em relação à disposição dos condutores na linha foi verificado que a magnitude das impedâncias próprias das fases guarda uma relação inversamente proporcional com o espaçamento com relação ao neutro. No caso das impedâncias mútuas a relação é diretamente proporcional com relação ao neutro, e inversamente proporcional com relação a elas mesmas. Foi comprovado que para uma geometria determinada, pequenas variações na posição dos condutores não modificam sensivelmente os valores das impedâncias.

Destaca-se que, na configuração analisada as três impedâncias próprias nunca adotam o mesmo valor, condição que sim pode ser conseguida para as impedâncias mútuas, para determinados espaçamentos. Desse modo, verifica-se que, em geral, esta configuração conduz a linhas elétricas desequilibradas. Por outra parte, comprovou-se que as impedâncias mútuas não são pequenas, mostrando uma variação entre 30 e 70% do valor das impedâncias próprias.

Este trabalho contribuiu a uma melhor compreensão da influência da geometria da linha elétrica e dos parâmetros dos seus condutores sob as impedâncias unitárias correspondentes, o que se revela de grande importância para estudos e projetos de linhas elétricas. As observações realizadas servirão de suporte para trabalhos futuros relacionados a análise de faltas em redes de distribuição, nas quais a matriz de impedância da linha tem um papel fundamental.

Agradecimentos

Os autores agradecem o apoio financeiro recebido da CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior) e CNPq (Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico).

Referências Bibliográficas

- Akke, M. e Biro T. (2005). Measurements of the frequency-dependent impedance of a thin wire with ground return. IEEE Transaction on Power Delivery, Vol. 20, No 2, pp. 1748-1752.
- Berleze, S. L. M.; Robert R (2003). Skin and Proximity Effects in Nonmagnetic Conductors. IEEE Transaction on Education, Vol. 46, No. 3, pp. 368-372.
- Carson, J. R. (1926). Wave propagation in overhead wires with ground return. Bell System Technical Journal, Vol. 4, No. 5, pp 539-554.

- Elguera, A. V.; Tavares, M. C. (2006). Influence of Transmission Line Transposition in Electromagnetic Transients Phenomena. In: IEEE PES Transmission and Distribution and Exposition Latin American, Venezuela.
- Gómez-Exposito, A.; Conejo, J. A.; Cañizares, C. (2009). *Sistemas de Energia Eléctrica*. LTC – Livros Técnicos e Científicos Editora Ltda., Rio de Janeiro - RJ.
- Ghijsselen, J. A.; Rychaert, W. R.; Melkebeek, J. A. (2003). Influence of Distribution Feeder Design on Resonance, In: Proc. of the Power Engineering Society General Meeting IEEE, pp. 1238-1243.
- Horton, R.; Halpin, M.; Wallace, K. (2006). Induced Voltage in Parallel Transmission Lines Caused by Electric Field Induction. In: Proc. 11th International Conference on Transmission & Distribution Construction, Operation and Live-Line Maintenance –ESMO.
- Kersting, W. H. *Distribution system modeling and analysis*. Boca Ratón: CRC Press, 2002.
- Kron, G. (1939). *Tensor analysis of networks*. New York: J. Wiley & Sons, New York.
- Kurokawa, S.; Filho, J. P.; Tavares, M. C.; Portela, C. M.; Prado, A. J. (2005). Behavior of Overhead Transmission Line Parameters on the Presence of Ground Wires. *IEEE Transaction on Power Delivery*, Vol. 20, No. 2, pp. 1669-1676.
- Kurokawa, S.; Filho, J. P.; Tavares, M. C.; Portela, C. M. (2001). Analyzing the Transmission Line Parameters in Frequency Domain. In: IEEE PES Winter Meeting, Vol. 2, pp. 878-883.
- Machado, V. M. M.; Faria, J. A. B.; Borges da Silva, S. F. (1990). Ground Return on Wave Propagation Parameters of Overhead Power Cables. *IEEE Transaction on Power Delivery*, Vol. 5, No. 2, pp. 825-832.
- Moreira, A. F.; Lipo, T. A.; Venkataramanan G.; Bernet, S. (2002). High Frequency Modeling for Cable and Induction Motor Overvoltage Studies in Long Cable Drives. *IEEE Trans. on Industry Applications*, Vol. 38, No. 5, pp. 1297 – 1306.
- Oliveira, J. C.; Paulsen, R. J.; Amaral, M. A.; Andrade, D. A. e Araújo, S. C. N. (1996). Electrical Transmission System with Variable Frequency Through Long Length Cable. In: Offshore Technology Conference, Houston.
- Tiebing, L.; Songtao, Z.; Xiang, C. (2007). Simulation of Electromagnetic Induction on DC Transmission Lines from Parallel AC Transmission Lines. In: Proc. 11th International Symposium on Electromagnetic Compatibility, pp. 114-117.